









Università degli Studi di Roma “Sapienza” - Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell’Architettura  
Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo - Settore disciplinare ICAR 17

Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXV - II sessione 2013

*Livia Fabbri*

**Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso metodologie  
di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia  
e della struttura dell’architettura.**



Scuola Nazionale di Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo





Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Roma 2013

Tutti i diritti sono riservati: nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcun modo (compresi fotocopie e microfilm) senza il permesso scritto del dottorando di Ricerca in "Scienze della Rappresentazione e del Rilievo dell'Architettura"

*Scuola Nazionale di Dottorato III ciclo - 2012/2014  
in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo*

*Sede centrale di coordinamento  
Università degli Studi di Roma "Sapienza"  
Direttore  
Cesare Cundari*

*Sedi consorziate  
Politecnico di Bari  
Università di Catania - Siracusa  
Università degli Studi "G. D'Annunzio" Chieti - Pescara  
Università degli Studi di Firenze  
Università degli Studi di Palermo  
Università Mediterranea di Reggio Calabria  
Università degli Studi di Roma "Sapienza"*

*Università degli Studi di Roma "Sapienza"  
Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo  
XXV Ciclo - Settore disciplinare ICAR 17*

*Coordinatore  
Cesare Cundari  
Collegio del Dottorato  
Piero Albisinni, Laura Baratin, Carlo Bianchini, Laura Carnevali, Anna Laura Carlevaris, Marco Carpiceci, Carlo Carreras, Andrea Casale, Antonio Catizzone, Emanuela Chiavoni, Cesare Cundari, Laura De Carlo, Marco Fasolo, Antonino Gurgone, Elena Ippoliti, Carlo Inglese, Alfonso Ippolito, Fabio Lanfranchi, Maria Martone, Riccardo Migliari, Lia Maria Papa, Leonardo Paris, Paola Quattrini, Luca Ribichini, Biagio Roma, Rocco Sinisgalli, Graziano Mario Valenti*

<i>Dottoranda</i> Livia Fabbri	<i>Coordinatore del Dottorato</i> Cesare Cundari          data .....
<i>Tutor</i> Mario Docci	
<i>Co - Tutor</i> Carlo Bianchini	





*A mio padre Antonello*





## Indice

### Introduzione

#### **1 Considerazioni generali e approccio metodologico del rilevamento con il laser scanner**

- 1.1 Alcuni cenni storici
- 1.2 Principi di funzionamento
  - 1.2.1 La riflettanza
  - 1.2.1 Classificazione dei laser
- 1.3 Laser scanner a tempo di volo
- 1.4 Le immagini RGB
- 1.5 Scelta e uso pratico del laser scanner
  - 1.5.1 Laser scanner distanziometrici
  - 1.5.2 Laser scanner triangolatori
  - 1.5.3 Posizionamento del sensore laser
  - 1.5.4 Portata del sensore laser
  - 1.5.5 Studio preliminare della geometria e delle dimensioni dell’oggetto da rilevare
  - 1.5.6 Studio preliminare dell’ambiente in cui si trova l’oggetto da rilevare
- 1.6 Problematiche
  - 1.6.1 Problematiche intrinseche dovute all’operatore
  - 1.6.2 Problematiche estrinseche generali
  - 1.6.3 Problematiche estrinseche dovute al rilevamento

#### **2 Il Tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa; Architettura e dettagli costruttivi; Interventi di modifica, restauro e rilievo**

- 2.1 Storia
- 2.2 Teologia e simbologia religiosa
- 2.3 Architettura e dettagli costruttivi
- 2.4 Interventi di modifica, restauro e rilievo
- 2.5 Ricerca iconografica come strumento di conoscenza

#### **3 Rilievo e studio del Tempietto di San Pietro in Montorio**

- 3.1 Problematiche e approccio
- 3.2 Tecnica del rilievo, fase per fase
  - 3.2.1 Prima fase: il progetto del rilievo
  - 3.2.2 Seconda fase: acquisizione dati
  - 3.2.3 Terza fase: trasformazione del modello numerico in un modello geometrico
  - 3.2.4 Quarta fase: produzione degli elaborati attraverso la proiezione del modello in scala

#### **4 Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di rilievo del Tempietto di San Pietro in Montorio**

- 4.1 Rilievo come conoscenza finalizzata all’analisi delle misure: raffronti con i rilievi storici
- 4.2 La riflettanza come strumento di analisi della materia ai fini del restauro
- 4.3 Presa dei dati per lo studio delle misure

#### **Conclusioni**

#### **Bibliografia**

#### **Ringraziamenti**



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*

*Dove non diversamente specificato tutte le immagini sono elaborazioni grafiche dell’autrice*





## INTRODUZIONE

*“Conciosia adunque (per tornare al proposito nostro) che Bramante sia stato il primo a mettere in luce la buona, e bella Architettura, che da gli Antichi sin ‘a quel tempo era stata nascosta, m’è paruto con ragione doversi dar luogo fra le antiche alle opere sue: e però ho posto in questo libro il seguente Tempio, ordinato da lui sopra il Monte Ianiculo: e perché fu fatto in commemoratorio di San Pietro apostolo, il quale si dice, che quivi fu crocefisso, si nomina S. Pietro in Montorio.”*

Palladio, I Quattro Libri, IV, XVII.

Nell’ultimo ventennio le metodologie di rilievo architettonico hanno subito una forte trasformazione.

Nuove possibilità di lavoro sono derivate infatti dallo sviluppo della scienza informatica e dal perfezionamento della tecnica di scansione laser. La sinergia di informatica ed elettronica permette un’acquisizione dei dati notevolmente più rapida che con i metodi di rilievo tradizionale, senza che questo vada a scapito del grado di incertezza di fatto più elevato.

Inoltre consente, in fase di elaborazione dei dati stessi, un’analisi che prevede diversi livelli di approfondimento.

Con l’uso delle nuove tecnologie di scansione in 3D, già di largo utilizzo in topografia, il rilievo architettonico consegue un carattere di scientificità mai raggiunto prima, grazie all’alto grado di precisione metrica ottenibile e alla reiterabilità del processo di rilevamento.

La presente tesi non vuole con ciò asserire che la tecnologia del laser scanner modifichi del tutto quella che è la buona prassi nell’affrontare un rilievo. Da un punto di vista procedurale, il percorso di conoscenza del manufatto architettonico resta comunque un lavoro da svolgere per fasi.

In una prima fase si parte da un progetto di rilievo, che consiste nella realizzazione di disegni in scala (eidotipi) e da una conseguente scelta dei metodi e delle strumentazioni con cui eseguire il rilievo stesso. È, questa, la fase di approccio al manufatto, il momento in cui occorre effettuare una valutazione – accurata quanto più sia possibile – delle problematiche di acquisizione dati che possono insorgere nella fase successiva.

Nella seconda fase, attraverso la creazione di una finestra di controllo entro cui operare, si imposta il reticolo (o maglia) con il quale si acquisisce la nuvola di punti (coordinate spaziali di un insieme di punti), ottenendo così un modello numerico analizzabile a più livelli. Nella terza fase tale modello numerico viene convertito in un corrispondente modello geo-





metrico, o matematico, in grado di definire graficamente le superfici attraverso l'uso delle NURBS (Non Uniform Rational Basis-Splines, curve geometriche utilizzate in computer grafica per la rappresentazione di superfici) o delle mesh (maglie poligonali costituite da una serie di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto poliedrico). Nell'ultima fase, infine, si raccoglie il frutto delle fasi precedenti, attraverso la messa a punto di elaborati che si ottengono proiettando il modello geometrico in scala, secondo precisi piani di riferimento.

Ed è proprio nell'ottica di un procedimento sincretico fra metodologie nuove e tradizionali, che la tesi qui proposta intende dimostrare le potenzialità del laser scanner non solo come strumento di acquisizione dati in sede di rilievo architettonico, ma anche come mezzo di analisi materica, strutturale e comparativa.

Se la scelta di esemplificazione della tesi è ricaduta sul Tempietto di San Pietro in Montorio del Bramante, si deve sia alla complessità del soggetto architettonico, che alla durata fortuna che riveste quale emblema di conoscenza dell'architettura classica. Fortuna riscontrabile nei numerosi rilievi già effettuati nel passato, lontano e recente, e che per noi costituiranno un'utile base di analisi comparativa.

A sostegno di tale scelta, si può aggiungere che il processo progettuale eseguito dal Bramante può essere rinvenuto in quelle regole metriche e formali che caratterizzano l'epoca classica cui si ispira la sua opera.

Regole che possono essere finalmente verificate attraverso un'accurata acquisizione ed elaborazione dei dati, che solo con la tecnologia di scansione laser si poteva ottenere.







“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*

## ***1. Considerazioni generali e approccio metodologico del rilevamento con il laser scanner***







“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## **1. Considerazioni generali e approccio metodologico del rilevamento con il laser scanner**

*Livia Fabbri*

### **1.1 Alcuni cenni storici**

Come già anticipato, la tecnica del laser scanner rappresenta un valido metodo che consente di creare modelli digitalizzati di oggetti di qualsiasi forma e grandezza, convertibili poi per mezzo di adeguati software informatici in solidi a tre dimensioni.

Il funzionamento del laser scanner<sup>1</sup> si basa sul metodo di misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche ed è il diretto discendente del distanziometro a onde brevettato da Balaicov e poi costruito da Lebedev negli anni '30 in Unione Sovietica. I distanziometri a onde divennero di uso comune negli anni '70, quando i prezzi degli strumenti che utilizzavano tale tecnologia divennero accessibili.

Per capire, però, come in tempi più moderni sia avvenuta la transizione dai metodi di misurazione tradizionali alla tecnologia laser, dobbiamo fare un passo indietro nel tempo.

Tornando al 1917, anno in cui l'allora trentottenne fisico di Ulm, Albert Einstein, ipotizzò che l'emissione di un raggio di luce ad alta energia da un atomo può essere stimolata da un raggio di luce di una certa frequenza incidente a lui stesso.

Questa scoperta fondamentale aprì la strada agli studi dei fisici statunitensi Charles Townes e Arthur Schawlow, che nel 1958 brevettarono il primo dispositivo che utilizzava la tecnologia laser.

Il termine laser (dall'acronimo L.A.S.E.R., Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), è da attribuire invece a un allievo di Townes, Gorgon

Gould, che rivendicava da tempo la paternità degli studi sull'emissione stimolata di radiazione, effetto per cui è possibile indurre un atomo a emettere radiazione “illuminandolo” con una radiazione dello stesso tipo.

Nel 1960, quando la diatriba era ancora tutt'altro che conclusa, il fisico Theodore Maiman, un ricercatore che lavorava per i laboratori Huyghens in California, osservò le reazioni della luce sulla struttura elettronica dell'atomo di rubino. Da qui, nacque il brevetto che condusse al primo dispositivo a emissione laser veramente utilizzabile.

Nello stesso anno, un altro fisico americano, di origine iraniana, Ali Javan, costruì in coppia con il collega William Bennett il primo dispositivo laser a elio-neon (definito all'epoca: Gas Optical Maser).

La battaglia legale fra Gould e Townes continuò fino al 1967, anno in cui l'assegnazione del premio Nobel per la fisica fu assegnato a Townes, congiuntamente al sovietico Basov e all'australiano Prokhorov (che con i loro studi avevano raggiunto conclusioni simili ai loro colleghi).

Lo sviluppo della tecnologia che utilizza il laser condusse a usi sempre più disparati (strumentistica di precisione / sistemi di puntamento militari / medicina), incrociando la sua strada con le tecniche di misurazione in campo topografico e poi architettonico.

Da quel momento, i metodi tradizionali di rilievo delle distanze (metodo di misurazione diretta e fotogrammetria), meno precisi e rapidi, hanno perso gradualmente di importanza a favore della tecnologia laser scanner.



## 1.2 – Principi di funzionamento

Per capire il funzionamento dei moderni strumenti di rilievo architettonico, dobbiamo entrare nello specifico campo di azione della tecnologia laser e del suo principio fondante, la riflettanza.

### 1.2.1 – La riflettanza

Per la scienza che studia i fenomeni ottici, la riflettanza (simbolo  $\rho$  e derivazione semantica dall’inglese *reflectance* e ancora dal latino *reflectere*) non è altro che la quantità proporzionale di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere. (Fig.1)

Ciò, perché ogni corpo sottoposto a emissione luminosa ha una determinata proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione della luce.

La riflettanza è così pensabile come il potere riflessivo di un corpo sottoposto a radiazione luminosa.

Pur essendo una grandezza a-dimensionale, la riflettanza è determinabile attraverso il rapporto tra la quantità di energia incidente e quella riflessa che ogni singolo materiale riemette in ogni direzione se colpito da un raggio laser (fig.8).

Per unire il concetto di riflettanza alla tecnologia laser scanner, dobbiamo pensare che il laser, nonostante le sue caratteristiche peculiari, è un’onda luminosa, ovvero una radiazione elettromagnetica. Perciò, come nel caso di altre emissioni luminose, il comportamento dei laser a contatto con i materiali genera una radiazione che è in parte assorbita, in parte trasmessa e in parte riflessa.

La somma dei parametri di assorbanza ( $\alpha$ ), trasmittanza

( $\tau$ ) e riflettanza ( $\rho$ ), dà sempre 1 ( $\alpha + \rho + \tau = 1$ ), equivalenza dimostrabile dal fatto che la totalità del raggio luminoso che incide sul corpo si frammenta, nel rispetto dei criteri del principio di conservazione dell’energia.

Andiamo ora a elencare le caratteristiche che, per le loro particolarità, rendono il laser un tipo di radiazione dai molteplici usi:

- 1) il laser deve essere necessariamente composto da un’unica frequenza di luce. In questo si distingue dal fascio di luce emesso da una torcia, che pur appearing monocromatico (bianco o colorato a seconda della lampada utilizzata) è composto da molte frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all’occhio umano
- 2) il laser deve necessariamente essere composto da un’onda elettromagnetica che si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità, rispondendo a precisi criteri di coerenza spaziale (o unidirezionalità). Ciò, a differenza della luce emessa da sorgenti di tipo tradizionale, che si irradia in tutte le direzioni
- 3) il laser deve necessariamente essere composto da onde di medesima frequenza e fase che, sommandosi fra loro, originano un treno di luce tale da poter essere spinto a intensità e potenza elevate, secondo un criterio di alta coerenza temporale (in particolare, elevatissimo è il livello di “potenza” che la luce laser può arrivare a raggiungere)

Le tipicità di questa forma di radiazione rendono possibili le applicazioni per la messa a punto del laser scanner,

uno strumento che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce laser.

Così come ogni tipo di radiazione luminosa ha differenti lunghezze d’onda (misurabili in nanometri), anche il laser ha le sue. Nello specifico, le radiazioni laser possono essere:

- ultraviolette** – lunghezza d’onda compresa tra i 200 e 400 nm
- visibili** – lunghezza d’onda compresa tra i 400 e i 700 nm
- infrarosse** – lunghezza d’onda compresa tra i 700 e i 300 nm

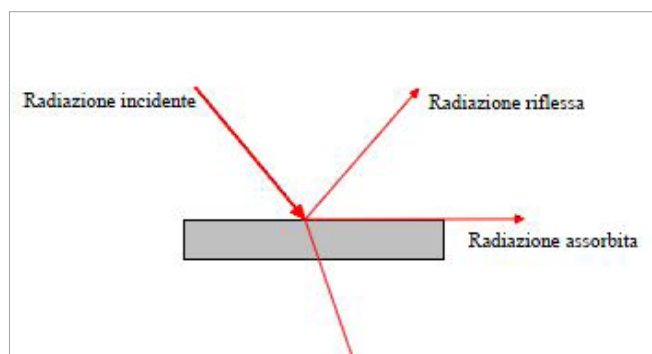


Fig. 1 –Immagine sui principi della riflettanza e della radiazione riflessa da Leandro Bornaz “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione.”

### 1.2.2 – Classificazione dei laser

La classificazione dei laser dipende dal materiale attivo che ne produce la radiazione.

Esistono quindi laser a stato solido, a gas, a semiconduttore, a liquido e laser a elettroni liberi.

Si possono infatti distinguere laser a CO<sub>2</sub>, a Nd-YAG, ad Argon, fotochemioterapici, a rubino, coloranti pulsati, a diodi, a eccimeri e così via.

Una particolare notazione va dedicata ai laser a semiconduttore, in quanto sono quelli maggiormente utilizzati per i laser scanner in commercio.

Di dimensioni assai compatte, tali laser vengono comunemente impiegati nei lettori di compact disc (CD) e nelle stampanti laser e si basano su una giunzione tra semiconduttori dotati di diversa conducibilità elettrica.

La cavità risonante è confinata alla zona di giunzione per mezzo di due pareti riflettenti.

Questi laser sono pompati mediante l’applicazione diretta di corrente elettrica alla giunzione, e possono operare in modalità a onda continua con un rendimento superiore al 50%.

Il semiconduttore più usato e più efficiente è l’arseniuro di gallio.

I più recenti sviluppi in questo settore sembrano promettere la realizzazione a breve termine di laser di dimensioni talmente piccole da poter essere inclusi in un chip di silicio.

Costituiti da nanofili di solfuro di cadmio, i nanolaser potrebbero consentire un ulteriore sviluppo della micro-componentistica elettronica.

### 1.3 – Laser scanner a tempo di volo

I laser scanner a tempo di volo (TOF dall’inglese: *time of flight* – Fig.2) funzionano in base al principio che la luce del laser, incontrando la superficie del manufatto da rilevare, viene riflessa. In questo modo lo scanner può restituire la forma di un manufatto architettonico grazie alla misurazione del tempo di volo, andata e ritorno, del raggio laser.

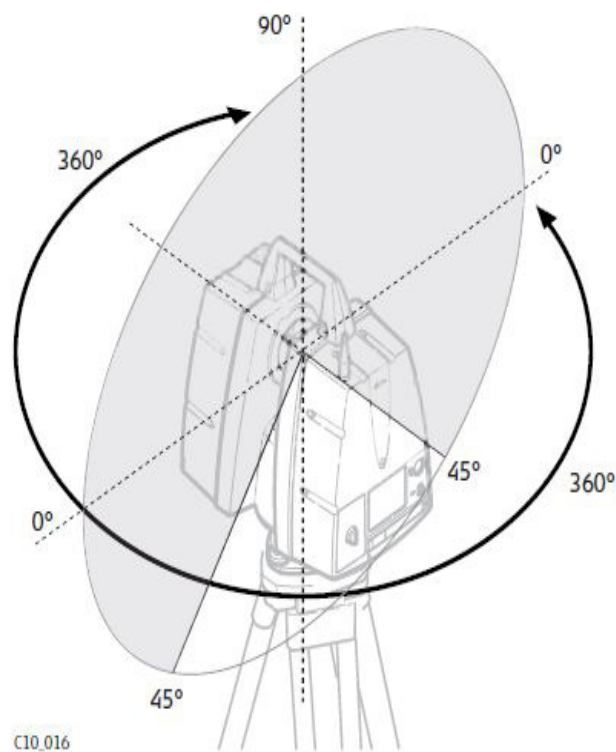


Fig. 2 – Laser scanner; assi di rotazione, Leica Geosystems

Sapendo che la velocità della luce è una costante e calcolando il tempo intercorso fra l’istante di partenza del raggio emesso dallo scanner e il suo ritorno, si può definire l’esatta distanza fra di essi. Questa è la tecnologia alla base di un semplice telemetro laser (di largo utilizzo anche in campo militare, per stabilire la distanza dal bersaglio da puntare).

Un laser scanner è costituito da un diodo emettitore (Fig.3) del raggio laser (telemetro laser) e da un sistema di specchi che consentono il suo spostamento lungo una serie di linee verticali e orizzontali che si muovono da sinistra a destra con un passo pre-impostato a seconda delle specifiche condizioni d’uso (vedi paragrafo 1.5 e successivi).

Il telemetro laser rileva la distanza di un punto nella direzione di vista. Poi, lo scanner legge il suo intero campo visivo, modificando il puntamento del telemetro per scansionare l’oggetto, esplorandone attivamente la forma e restituendola punto per punto.

La direzione di visualizzazione del telemetro laser può essere corretta ruotando il telemetro stesso, o utilizzando un sistema di specchi rotanti.

Questo metodo è comunemente usato perché gli specchi sono leggeri e possono quindi essere ruotati molto più velocemente e con maggiore precisione del telemetro.

Tale tipologia di laser scanner viene impiegata per scansioni di oggetti medio-grandi, distanti da 0.5 a 300m (dato riferito al laser scanner HDS C10 della Leica Geosystem).

La precisione di un laser scanner a tempo di volo 3D dipende da quanto siamo in grado di misurare con pre-

cisione il tempo. Si tratta di parametri assai piccoli, se pensiamo che il tempo che impiega la luce a percorrere 1 millimetro è di circa 3.3 picosecondi.

Rispetto alla precisione del dettaglio in termini di nuvola di punti, alcuni modelli di laser scanner a tempo di volo 3D sono in grado di misurare la distanza di 10.000 / 100.000 punti al secondo.

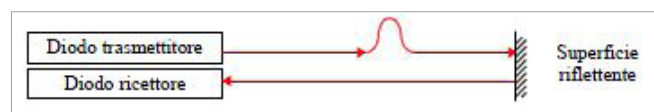


Fig. 3 – Funzionamento del laser, diodo trasmettitore e ricevitore, comportamento sulla superficie. Una parte del laser viene assorbita ed una parte riflessa da Leandro Bornaz “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione.”.

#### 1.4 – Le immagini RGB

Durante il processo di acquisizione dati, vengono scattate delle fotografie che forniscono immagini in parametri RGB, supporto fondamentale per un’accurata restituzione colorimetrica dell’oggetto da rilevare. Per capire meglio cosa si intende per immagini RGB, occorre soffermarsi sulla teoria tricromatica del colore.

Il modello di colore RGB (Fig.4) è basato sulla teoria tricromatica di Thomas Young e Hermann Helmholtz, formulata nella prima metà del XIX secolo, da cui trasse i suoi studi, a sua volta, James Clerk Maxwell.

Alla base di queste teorie c’è l’assunto scientifico che ha dimostrato che il cervello umano interpreta la luce incidente la retina in termini di colore.

Da secoli i pittori sapevano che mescolando tre colori

primari (rosso, giallo e blu) si ottiene qualsiasi tonalità cromatica.

La teoria cromatica di Thomas Young è basata su tre ricettori dell’occhio, ciascuno dei quali reagisce soprattutto alle tonalità del rosso, del verde e del violetto.

Questa teoria fu ripresa da James Clerk Maxwell (1831-1879), che iniziò gli esperimenti sulle mescolanze di colore a Edimburgo nel 1849 e nel 1860 elaborò la teoria del “triangolo dei colori”.

Diversamente dalle immagini a livelli di grigio, il modello RGB è di tipo additivo nel senso che i tre fasci di luce contenenti le informazioni che l’occhio umano interpreta come i tre colori primari (rosso, verde e blu, *red/green/blue*, da cui appunto l’acronimo RGB) si sovrappongono. Sovrapponendosi nelle giuste modalità, le loro differenti lunghezze d’onda mutano in una nuova lunghezza d’onda finale, capace di rendere quasi tutto lo spettro dei colori visibili (con l’eccezione delle porpore).

Più specificamente i tre colori principali corrispondono a forme di radiazione luminosa (onda) di periodo fisso, quali:

*rosso* – con una lunghezza d’onda di 700,47 nm

*verde* – con una lunghezza d’onda di 546,09 nm

*blu* – con una lunghezza d’onda di 455,79 nm

All’interno della miscela di colori primari, ciascun componente può variare da zero a un valore massimo definito. Sovrapponendo i tre colori primari con la loro intensità massima si ottiene il bianco più luminoso rappresentabile (cioè tutta la luce viene riflessa).



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Oppure una sovrapposizione dei tre colori di intensità zero dà il colore più scuro (ovvero il nero, assenza di colore).

Gli intervalli di intensità del colore possono essere quantificati in diversi modi:

Da 0 a 1, con qualsiasi valore frazionario fra i due valori. Questa quantificazione è usata di solito per l’elaborazione di analisi teoriche, o in sistemi che utilizzano rappresentazioni con la virgola mobile.

Altro modo di quantificare l’intensità dei colori primari è il valore percentuale, dallo 0%, al 100%.

Nei computer, i valori dei componenti cromatici sono spesso quantificati mediante numeri interi compresi tra lo 0 e il 255 (la gamma standard di un PC a 8 bit per canale). Ma sono anche rappresentati da numeri decimali o esadecimali.

Apparecchi digitali di fascia più alta sono spesso in grado di affrontare immagini dalla gamma di intensità dei tre colori primari dallo 0 al 1023 (10 bit), dallo 0 al 65535 (16 bit) o anche di più, estendendo i 24 bit di base (8 x 3 canali) a 32, 48 o 64 bit.

La qualità del bianco dipende dalla natura delle fonti luminose primarie che, se correttamente equilibrate, danno come risultato un bianco neutro.

Quando le intensità dei tre componenti sono le stesse, il risultato è una tonalità di grigio, più scuro o più chiaro a seconda dell’intensità.

Quando le intensità sono differenti, il risultato è una tonalità di colore più o meno satura a seconda della percentuale di intensità dei singoli colori primari.

Ovviamente, quando uno solo fra i componenti ha un’in-

tensità massima, il colore totale è vicino a quel colore primario (rosso, verde o blu).

Una combinazione di coppie di colori primari ad alta intensità dà colori di tonalità secondaria, quali il ciano, il magenta e il giallo.

Quindi un colore secondario è costituito dalla somma di due colori primari di uguale intensità: il ciano è dato da una sovrapposizione di verde + blu; il magenta da una sovrapposizione di rosso + blu; il giallo nasce da una sovrapposizione di rosso + verde.

Ogni colore secondario è il complemento di un colore primario: quando un colore primario e il suo complementare secondario si sommano, il risultato è bianco.



Fig.4 – RGB, schema della sintesi additiva.





Il modello di colore RGB in sé non definisce cosa si intende per rosso, verde e blu.

Ciò significa che il risultato della miscelazione fra di essi non è quantificabile come valore assoluto, ma dipende dal valore di riferimento iniziale (diverse tonalità di colori primari, rendono diverse le scale di valori cromatici assoluti).

Questo dipende dal fatto che la scelta dei colori primari è legata alla fisiologia dell’occhio umano e, quindi, possono essere considerati buoni modelli di colore primario, quegli stimoli che massimizzano la differenza tra le risposte delle cellule cono della retina e le differenze di lunghezza d’onda della luce, o che, più semplicemente, hanno un triangolo di colore esteso.

I tre tipi ordinari di cellule fotorecettive sensibili alla luce nell’occhio umano rispondono più alla luce rossa (lunghezza d’onda lunga, L), verde (media, M), e blu (corta, S), con picchi rispettivamente vicini ai 570 nm, 540 nm e 440 nm.

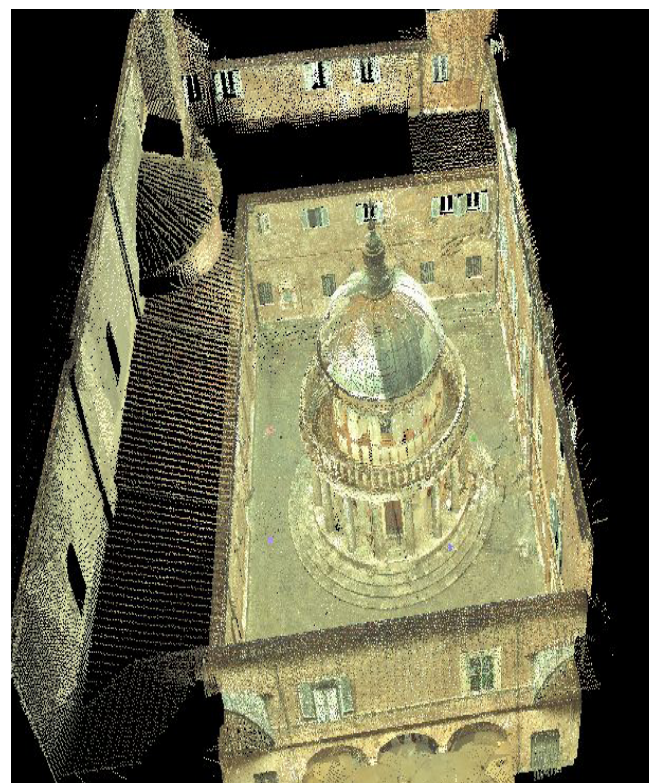
La differenza nei segnali ricevuti dai tre tipi di cellule permette al cervello di differenziare un largo gamut di colori diversi, essendo più sensibile soprattutto alla luce verde-giallognola e alle differenze di tonalità nella regione verde-arancione.

L’uso dei tre colori primari non è sufficiente a riprodurre tutti i colori: solo quelli all’interno del triangolo dei colori, definito dalla cromaticità di quelli primari, possono essere riprodotti tramite sintesi additiva (sovrapposizione) di quantità non negative di tali colori.

Ad esempio, si supponga che un fascio di luce nella gamma delle lunghezze d’onda dell’arancione (da circa 577 nm, a circa 597 nm) entri nell’occhio e colpisca la retina.

La luce di queste lunghezze d’onda attiverà entrambi i coni di lunghezza d’onda media e lunga della retina, ma non stimolerà la risposta per altre lunghezze d’onda.

La differenza nella risposta può essere rilevata dal cervello e associata con il concetto che la luce è arancione. In questo senso, il colore arancione degli oggetti è semplicemente il risultato della luce che colpendo l’oggetto viene rimandata al nostro occhio, stimolando i coni recettori pertinenti, contemporaneamente, ma in misura diversa.



*Fig.5 – Screen shot della nuvola di punti in colori rgb*

### 1.5 – Scelta e uso pratico del laser scanner

Come ben rappresentato dalla fondamentale ricerca di Leandro Bornaz<sup>2</sup>, l’ergonomicità del laser scanner può generare la falsa sensazione che l’acquisizione dati per un rilievo sia semplice.

In effetti, stazionato lo strumento e, successivamente, scansionato l’oggetto, si può ottenere rapidamente una sua restituzione digitale sotto forma di nuvola di punti.

Va detto, tuttavia, che ogni acquisizione di dati col laser non è un’operazione fine a se stessa ma sottintende usi e scopi specifici.

In quest’ottica, l’acquisizione dati va considerata solo come una delle fasi di un processo e un lavoro approssimativo può facilmente inficiare la qualità delle fasi successive. L’arbitrarietà del riscontro laser costringe, nel peggiore dei casi, alla ripetizione del rilievo con aumento del tempo di esecuzione del progetto e di conseguenza del suo costo complessivo.

Ecco perché, come detto nella premessa, il modo migliore di affrontare un rilievo con la tecnologia laser scanner è progettare consapevolmente e preventivamente la fase di acquisizione dati.

Tenere conto dei tempi a disposizione per l’esecuzione del progetto e dell’estensione del rilevamento, ad esempio, può risultare decisivo per la scelta dello strumento da utilizzare.

Il mercato offre un’ampia gamma di strumenti dalle molteplici funzioni e caratteristiche che, come già specificato, sono di facile utilizzo e consentono scansioni laser sempre più precise, affidabili e veloci (rispetto al numero di punti scansionabili al secondo).

Esistono strumenti che riescono ad acquisire dati pressoché completi sull’ambiente che li circonda attraverso un

unico stazionamento, senza che vi sia mai la necessità di spostarli.

Al contrario, ve ne sono altri di grande precisione ma limitati in termini di ampiezza.

Altre caratteristiche da tenere in considerazione per una corretta scelta dello strumento più adatto al rilievo da effettuare, sono la portata, la precisione e la velocità di acquisizione dei punti.

Proprio questa grande varietà di strumenti a disposizione dei tecnici non permette la codifica di un progetto laser scanner in termini generici.

È possibile altresì basare le proprie scelte sulla base di classificazioni di ordine tecnico quali, ad esempio, il modello di strumento laser da utilizzare a seconda del principio di acquisizione dei dati.

#### 1.5.1 – Laser scanner distanziometrici

Come nel caso di alcune stazioni topografiche, i laser scanner distanziometrici vengono considerati stazioni totali a elevata automazione, e fondano l’acquisizione dati su tre misure specifiche, che rappresentano le coordinate sferiche dell’oggetto in esame. (Fig.6)

- 1) angolo azimutale (orizzontale)
- 2) angolo zenitale (verticale)
- 3) distanza inclinata

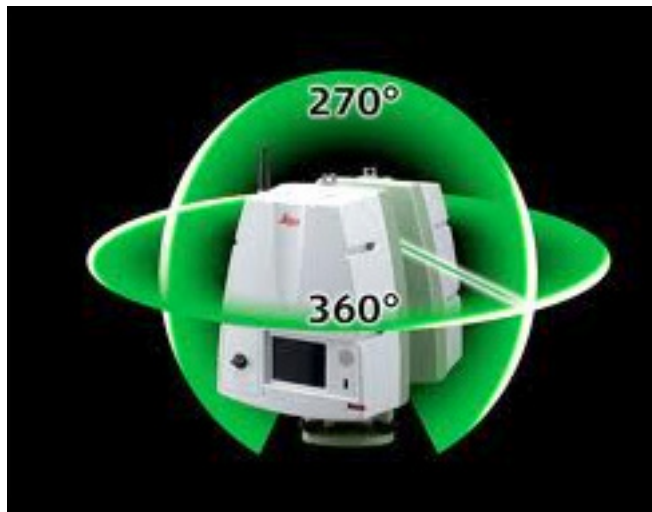
Le differenze tra il rilievo topografico e quello mediante laser scanner consistono però nella sostanza del dato acquisito.

Se in un rilievo topografico dell’oggetto vengono presi a riferimento dei precisi punti chiaramente riconoscibili

a occhio nudo e di questi punti saranno misurate le coordinate, nel caso di una scansione laser non si possono scegliere precisi punti da rilevare, ma si lavora sulla definizione di un’area particolare dell’oggetto (o l’oggetto nella sua interezza, se non è di grandi dimensioni).

Una volta impostati i parametri di densità di punti da scansionare, ma distribuiti in modo casuale sull’oggetto, automaticamente lo strumento definisce l’oggetto stesso restituendolo sotto forma di una nuvola di punti. Punti che non sono dunque quelli di riferimento classici di un tradizionale rilievo topografico.

I laser scanner distanziometrici sono solitamente a tempo di volo, e sono dotati di distanziometri laser a impulsi che permettono di effettuare misurazioni veloci e molto precise (dell’ordine dei 5 – 10 mm).



*Fig. 6 – Scan Station C10.*

La portata massima del sensore in dotazione a un moderno laser scanner (classe 1, non pericoloso per la vista), è di circa 800 m.

Negli strumenti in cui la distanza è misurata per differenza di fase, la precisione aumenta a scapito della rapidità di esecuzione della scansione e della portata massima.

### *1.5.2 – Laser scanner triangolatori*

A differenza degli apparecchi distanziometrici, i laser scanner triangolatori misurano la posizione dei punti mediante il principio dell’intersezione in avanti.

La posizione del punto viene determinata attraverso tre misure: una distanza e due angoli (di cui uno è quello che si forma tra il raggio emesso e la base dello strumento, mentre l’altro è l’angolo che si forma tra il raggio riflesso e la base stessa).

È un metodo che si adatta a rilievi a corto raggio (short range) e per la determinazione e restituzione di dettagli architettonici.

Di forma allungata o tubolare, i laser triangolatori montano ai due estremi dei diodi (uno per l’emissione del raggio laser, l’altro per la sua ricezione).

A collegare i diodi, un segmento (detto comunemente base) la cui dimensione arriva circa al metro di lunghezza, misura massima per non superare limiti pratici di manovrabilità.

L’acquisizione dati fornita dalla triangolazione è sub-millimetrica, pertanto molto precisa.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Ma ha una portata massima limitata (dell’ordine di qualche metro), e tempi di acquisizione mediamente elevati. Per il rilievo del Tempietto di San Pietro in Montorio la scelta è ricaduta su uno scanner laser di nuovissima generazione di tipo distanziometrico, il C10 prodotto dalla Leica Geosystems, in possesso del Laboratorio di Rilievo del Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell’Università La Sapienza di Roma.

La geometria e la volumetria dell’oggetto architettonico da rilevare e le costrizioni imposte dallo spazio limitato in cui operare il rilievo (vedi paragrafo 1.5.5 e 1.5.6), hanno di fatto guidato tale scelta, eliminando a priori la possibilità d’uso di un laser scanner triangolatore.

#### 1.5.3 – Posizionamento del sensore laser

Un altro criterio di valutazione dello strumento più adatto al caso specifico può essere ispirato ai suoi parametri tecnici, quali il posizionamento del sensore laser o la sua portata.

Rispetto alla messa in stazione, esistono due tipi di laser: statici e mobili. Avendo una posizione fissa, i laser statici acquisiscono sempre una stessa scena, e vengono generalmente impiegati in compiti di controllo meccanico, per il monitoraggio di movimenti e deformazioni delle strutture, o per rilievi di alta precisione.

I laser scanner mobili, o trasportabili, sono quelli più utilizzati nel campo del rilevamento topografico e architettonico. Si tratta di strumenti di dimensioni ridotte che sono posizionati su treppiedi e consentono una facile inquadratura della zona desiderata.

#### 1.5.4 – Portata del sensore laser

La portata di un laser scanner è corrispondente al tipo di materiale colpito dalla radiazione laser e soprattutto dalla sua riflettività rispetto alla lunghezza d’onda del raggio emesso.

Maggiore è la riflettività dell’oggetto rilevato, maggiore sarà la portata ottenibile.

Al contrario, minore è la sua riflettività (e quindi maggiore la parte di energia assorbita), minore sarà la portata del laser scanner.

Questo è causato dalle proprietà ottiche della luce e delle superfici riflettenti: il raggio riflesso dalla superficie si propaga nell’atmosfera, che non è altro che un corpo trasparente e, come tale, ha a sua volta la proprietà di assorbire, trasmettere e riflettere una qualsiasi radiazione elettromagnetica.

Nonostante, nei limiti di operabilità dei laser, l’effetto di attenuazione del segnale sia abbastanza ridotto, è facilmente dimostrabile da prove empiriche come tale effetto di attenuazione aumenti all’aumentare della distanza che si vuole rilevare.

Se la quantità di raggio riflesso da una superficie è particolarmente debole, questo si disperde velocemente nell’ambiente, per cui la distanza massima rilevabile in questo caso diminuisce.

Considerato ciò, possiamo distinguere gli strumenti per la scansione laser in:

1) *a piccola portata* (<1 m, in genere laser triangolatori con precisioni sub-millimetriche)



2) *a media portata* (da 1 m a 50 m, distanziometrici o triangolatori con precisioni da 0.2 a 6 mm)

3) *a lunga portata* (da 50 m a 1000 m, distanziometrici con precisioni da 5mm a 2 cm)

Viste le caratteristiche di precisione, portata e velocità nell’acquisizione dati per le differenti tipologie dei sensori laser, va detto anche che esistono numerosi altri aspetti da considerare per stabilire la qualità di uno strumento laser scanner e la sua compatibilità con la progettazione di rilevamento di un determinato oggetto.

Volendo enumerare tutte le caratteristiche tecniche di uno strumento laser scanner, si potrebbe fare riferimento a questa lista:

- 1) velocità di acquisizione
- 2) risoluzione di scansione e divergenza del raggio laser
- 3) portata nominale ed effettiva
- 4) campo di misura
- 5) acquisizione dell’intensità di segnale riflesso ricevuto (riflettività)
- 6) riconoscimento automatico di segnali
- 7) acquisizione RGB (interna o attraverso apparecchi esterni)
- 8) autonomia operativa dello strumento
- 9) maneggevolezza
- 10) facilità d’uso e presenza di software di acquisizione e di gestione dei dati

#### *1.5.5 – Studio preliminare della geometria e delle dimensioni dell’oggetto da rilevare*

Un altro criterio di valutazione dello strumento da utilizzare può derivare dallo studio preliminare dell’oggetto che si vuole rilevare e dall’ambiente nel quale l’oggetto si trova.

Redigere un progetto di rilevamento laser esauriente, presuppone ovviamente una conoscenza della geometria e delle dimensioni dell’oggetto da acquisire.

Parlando di geometria dell’oggetto, non si può fare a meno di ragionare in termini di scala di grandezza. Qualsiasi sia l’oggetto da rilevare, la quantità di dettagli che se ne possono cogliere dipende dalla distanza dalla quale esso viene osservato.

Più vicino è l’oggetto, più grande sarà la scala e maggiore il numero di dettagli che si possono cogliere.

Tale concetto è valido anche per il laser scanner: a parità di altre condizioni (passo di scansione, precisione, ecc.) maggiore è la vicinanza dell’oggetto, maggiore sarà il numero di punti acquisito sulla stessa porzione d’oggetto. Al contrario, la precisione con cui lo strumento misura la posizione di ogni punto non dipende tanto dalla distanza di acquisizione, quanto dal tipo di laser utilizzato.

L’attenzione va posta invece sulla capacità di acquisire, da parte del sensore, le piccole discontinuità presenti sulla superficie dell’oggetto. Se i punti rilevati dal laser si trovano mediamente a una distanza inferiore alla dimensione delle discontinuità, queste saranno visibili nel modello tridimensionale. Mentre, se i punti acquisiti distano tra loro in misura superiore alla dimensione delle discon-



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

tinuità presenti sull’oggetto, queste non saranno visibili nel modello 3D acquisito.

Ne consegue che, a seconda del tipo di dettaglio che si vuole acquisire, è necessario progettare il passo di scansione e la distanza di acquisizione per ogni stazione del rilievo.

Se invece l’intenzione è quella di acquisire i dati di un oggetto dalla geometria semplice, la distanza da cui effettuare il rilievo non è l’aspetto più importante da considerare.

In questo caso è molto più importante il concetto di densità di punti.

Se la geometria dell’oggetto è particolarmente semplice non è necessario effettuare scansioni a elevata densità, anche per evitare di ottenere un numero eccessivo di informazioni per la descrizione di entità geometricamente semplici.

D’altro canto la densità di informazioni rilevate sull’oggetto non deve scendere in modo drastico, per mantenere alto il livello di analisi e rendere possibile il riconoscimento di entità geometriche in modo automatico, attraverso la nuvola di punti acquisiti.

È il caso, qui, di prendere a esempio il Tempietto di San Pietro in Montorio, la cui geometria presenta non poche difficoltà. (Fig.7)

In effetti, dovendo realizzare un rilievo di un oggetto dalle dimensioni ridotte, come potrebbe essere il caso del Tempietto, si potrebbe ipotizzare che per una sua intera descrizione basti una singola scansione laser.

Passiamo a illustrare come ciò, in realtà, non sia stato possibile.

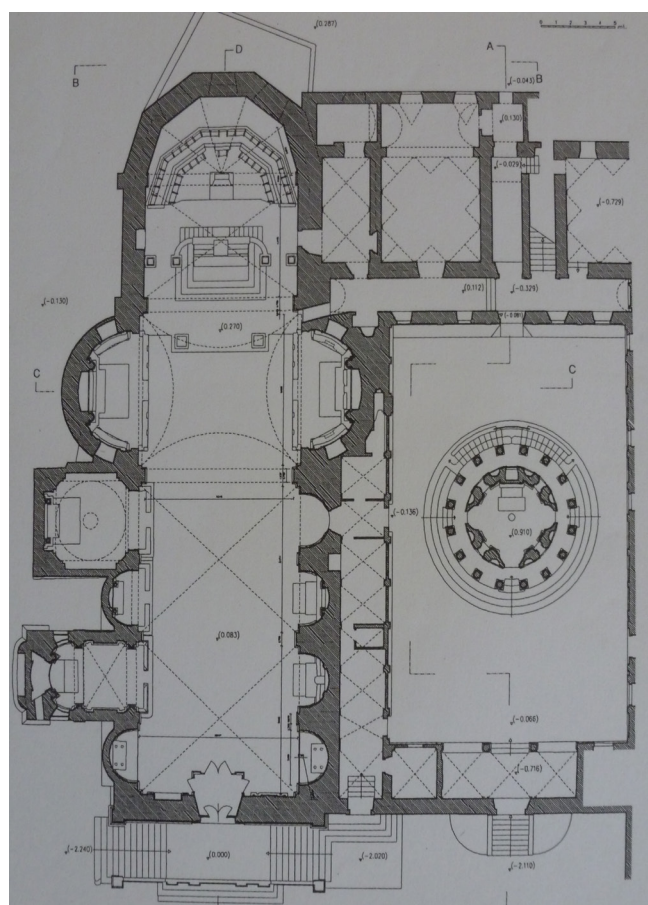


Fig. 7 – Rilievo del complesso di San Pietro in Montorio di F. Cantatore.

La pianta, impostata dal Bramante secondo la tipologia del martyrium, si sviluppa da un punto centrifugo – secondo la tradizione il punto in cui fu versato il sangue di Pietro – in n assi che si irradiano verso l’orizzonte circolare del mondo. (Fig.8)



Fig. 8 – Fotografie del Tempietto di San Pietro in Montorio e del chiostro nel quale è inserito .

Il portico periferico è circondato da sedici colonne che simboleggiano il mondo esterno e al suo interno vi è la cella, con quattro cappelle sugli assi diagonali e quattro ingressi, di cui uno al livello inferiore, dedicato all’accesso della cripta.

Tale geometria, assai articolata, suscita delle riflessioni su come affrontare il rilievo di questo particolare oggetto di pianta circolare. Infatti, volendo analizzare l’alzato esterno, ci si rende subito conto che la tripartizione esterna divisibile in peribolo rialzato, tamburo e cupola, deve a sua volta, essere rilevata in due fasi: dal basso e dall’alto, da due punti privilegiati dell’Accademia Spagnola. Per l’analisi della parte inferiore, ci si dovrà posizionare in asse ad ogni intercolumnio, così da evitare la genesi di eccessivi coni d’ombra. All’interno, sempre stazionati sull’asse verticale ideale, si potrà effettuare un’unica ripresa per la cella e per la cripta.

Laddove, poi, l’oggetto sia di dimensioni maggiori solo più scansioni, eseguite da diverse visuali, potranno rendere il rilievo esaustivo. E’ necessario, nel caso di molteplici scansioni, ricordare che ognuna di esse è espressa in un proprio sistema di riferimento locale. E che, nella pianificazione del rilievo, si dovrà già aver previsto il metodo che si intende utilizzare per l’allineamento di due scansioni adiacenti e nell’eventuale successiva triangolazione fra tre o più scansioni.

Come attesta l’ampia bibliografia sul tema, (vedere bibliografia) esistono varie metodologie per l’allineamento delle scansioni: software completamente automatici e software che, nel riconoscimento dei singoli punti di scansione, prevedono l’intervento manuale dell’operatore.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri



Fig. 9 – Fotografia del chiostro di San Pietro in Montorio dove è situato il Tempietto di Donato Bramante.

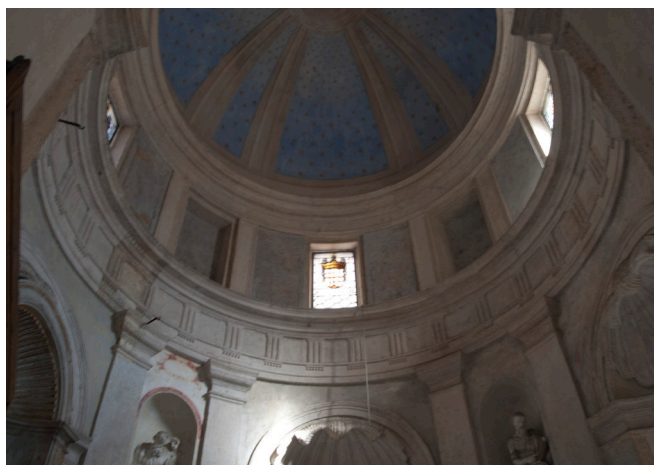


Fig. 10 – Fotografia della cupola del Tempietto di Donato Bramante.

In campo topografico si fa ampio uso di adesivi riflettenti (*markers*) o di entità geometriche di allineamento (ad esempio, sfere) da utilizzare tra due scansioni adiacenti come target ai fini del riconoscimento – sia manuale, sia automatico – dei punti.

Facilmente riconoscibili all’interno delle due nuvole di punti adiacenti, questi riferimenti permettono l’allineamento automatico delle due scansioni. Anche in questo caso, il numero di oggetti, la loro posizione e la loro dimensione, deve essere stabilita a priori, in funzione dell’oggetto da rilevare e del luogo in cui verranno effettuate le acquisizioni.

Proprio a causa della sua complessa conformazione, il Tempietto del Bramante si dimostra ancora un ottimo esempio per la progettazione di un rilievo effettuato mediante scansione laser.

Il Tempietto sorge in un chiostro, un’angusta area compresa tra la chiesa di San Pietro in Montorio e il convento omonimo, al centro della quale era presente la sacra caverna in cui si pensava fosse avvenuto il martirio dell’apostolo fondatore della Chiesa cristiana.

Intorno all’anno 1500, la superficie del chiostro venne per la prima volta livellata e pavimentata, e fu poi realizzato un piccolo porticato con pilastri ottagonali in funzione di filtro di accesso con gli ambienti circostanti.

Il chiostro che avrebbe dovuto essere circolare secondo la rappresentazione di Sebastiano Serlio, così da evidenziare la perfetta simmetria della struttura e sottolineare la centralità del Tempietto. Ma il chiostro circolare non fu





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 1. Considerazioni generali e approccio metodologico del rilevamento con il laser scanner

Livia Fabbri

mai costruito e l’attuale, rettangolare, comprime il tempio sul lato corto, lasciando solo due metri di luce dal podio al muro perimetrale del cortile stesso.

Tenendo conto del fatto che, il solo diametro ideale del treppiedi su cui fissare lo scanner laser è di circa un metro, occorre una accurata valutazione del suo posizionamento, nonché del passo di scansione da utilizzare in rapporto alla distanza media delle superfici e una ottimale regolazione del probe (definito come sfera media ideale tangente le superfici da scansione).

Il procedimento più idoneo era regolare un passo di scansione per le differenze fra le riprese esterne e interne, e un altro passo per lo spazio del chiostro (vedere a tal riguardo il terzo capitolo).

In sostanza, dovevano essere eseguite tre tipologie di riprese:

- 1) corrispondente alla poligonale esterna, con funzione di ripresa generale della spazialità, da eseguire con un passo relativamente ampio
- 2) ripresa a maglia fitta del Tempietto, per acquisirne i vari dettagli costruttivi, eseguita in asse rispetto agli intercolumni, con il fine di coprire anche i coni d’ombra generati dalla scansione stessa
- 3) interni, con un passo portato ai limiti dello strumento stesso per una scansione ineccepibile di stucchi alle pareti e pavimentazione in cosmateschi



Fig. 11 – Fotografia del Tempietto di San Pietro in Montorio, particolare dell’architrave e del tamburo.



#### 1.5.6 – Studio preliminare dell’ambiente in cui si trova l’oggetto da rilevare

Nella formulazione di un progetto di acquisizione dati per mezzo della scansione laser occorre considerare l’ambiente in cui si trova il soggetto come un “ostacolo” alla realizzazione della scansione stessa.

Si deve essere pronti a posizionare il sensore in modo che nulla, persone o cose, turbi col movimento o in altro modo l’acquisizione di dati utilizzabili.

Se si tratta di un luogo come il Tempietto del Bramante si è facilitati dal conoscere gli orari di minima affluenza delle zone esterne (chiostro) e quelli di chiusura al pubblico per l’interno. Ma un ulteriore problema è rappresentato dalla luce solare che, in determinate ore, potrebbe infastidire il sensore laser. In questo caso, il procedimento deve prevedere che le riprese avvengano in opposizione alla luce diretta.

Ultimo criterio di cui tener conto nella scelta dello strumento laser scanner da utilizzare per il rilievo architettonico è l’opportunità di controllo in tempo reale dei dati scansionati.

Ciò permette di verificare che tutti gli oggetti che ci si era prefissati di acquisire siano stati digitalizzati.

Qualora, però, questo non sia possibile, esistono dei *software* di acquisizione e gestione dello strumento che consentono una rapida integrazione dei dati stessi, senza dover ricorrere a un ulteriore rilevamento sul campo.

### 1.6 Problematiche

Le problematiche<sup>3</sup> che possiamo riscontrare con l’utilizzo del laser scanner sono molteplici e possono essere divise in intrinseche ed estrinseche.

#### 1.6.1 – Problematiche intrinseche dovute all’operatore

1) *Scelta dei punti*: all’attuale livello tecnologico e lavorando su una maglia di punti la cui scansione è gestita automaticamente dallo strumento, il rilevatore non è in grado di effettuare una scelta dei punti notevoli che definiscano meglio la morfologia del manufatto

2) *Errore umano*: è l’errore più temuto perché dipende dall’esperienza, dall’attenzione e dalla perfetta conoscenza degli strumenti adoperati da parte del rilevatore. Ciò non permette una previsione scientifica della sua percentuale di incidenza nella progettazione di un rilievo, né una sistemica modalità di intervento preventivo atto a neutralizzarlo o a ridurlo consistentemente

#### 1.6.2 – Problematiche estrinseche generali

1) *Clima*: ovviamente le condizioni meteorologiche influenzano l’acquisizione dei dati, data anche la loro caratteristica imprevedibilità. Ciò interferisce sul planning delle fasi di acquisizione e, a volte, sul costo generale della progettazione del rilievo

### 1.6.3 – Problematiche estrinseche dovute al rilevamento

1) *Coni d’ombra*: sono zone del manufatto nascoste alla scansione del laser e non permettono di rilevarne ogni aspetto. Il problema, dove non sia possibile visualizzare la zona direttamente con il laser, può essere risolto integrando i punti stazione e facendo ricorso al rilievo diretto. (Fig.12)

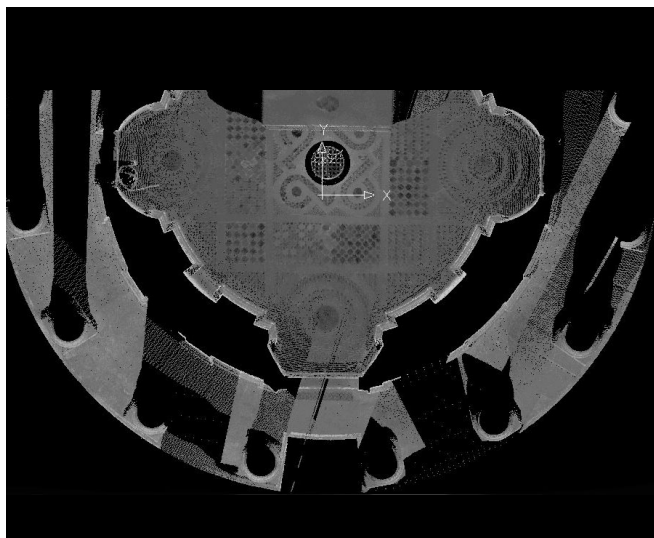


Fig.12 – Screen shot della nuvola di punti in toni di grigio dove appare evidente la problematica dei coni d’ombra.

2) *Il rumore*: è dato dalla sovrapposizione di più scansioni in una determinata area e dalla non perpendicolarità dei raggi rispetto alla superficie rilevata. Ne consegue che il rumore diminuisce quando la raccolta di dati è più perpendicolare possibile alla superficie dell’oggetto scansionato e quando la sovrapposizione delle nuvole di

punti viene eliminata in fase di pulizia del dato attraverso l’uso del software *Cyclone*. (Fig.13)

3) *Elaboratori*: per gestire una elevata quantità di dati in fase di elaborazione è necessario disporre di una *workstation* con un livello elevato di prestazioni. Ciò aumenta i costi di progettazione del rilievo e prevede una preparazione tecnica adeguata del rilevatore

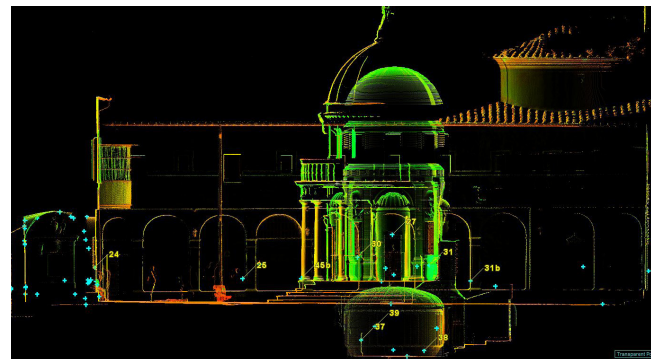


Fig. 13– Screen shot in dato riflettanza con modalità profili dove appaiono delle zone di rumore.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Livia Fabbri

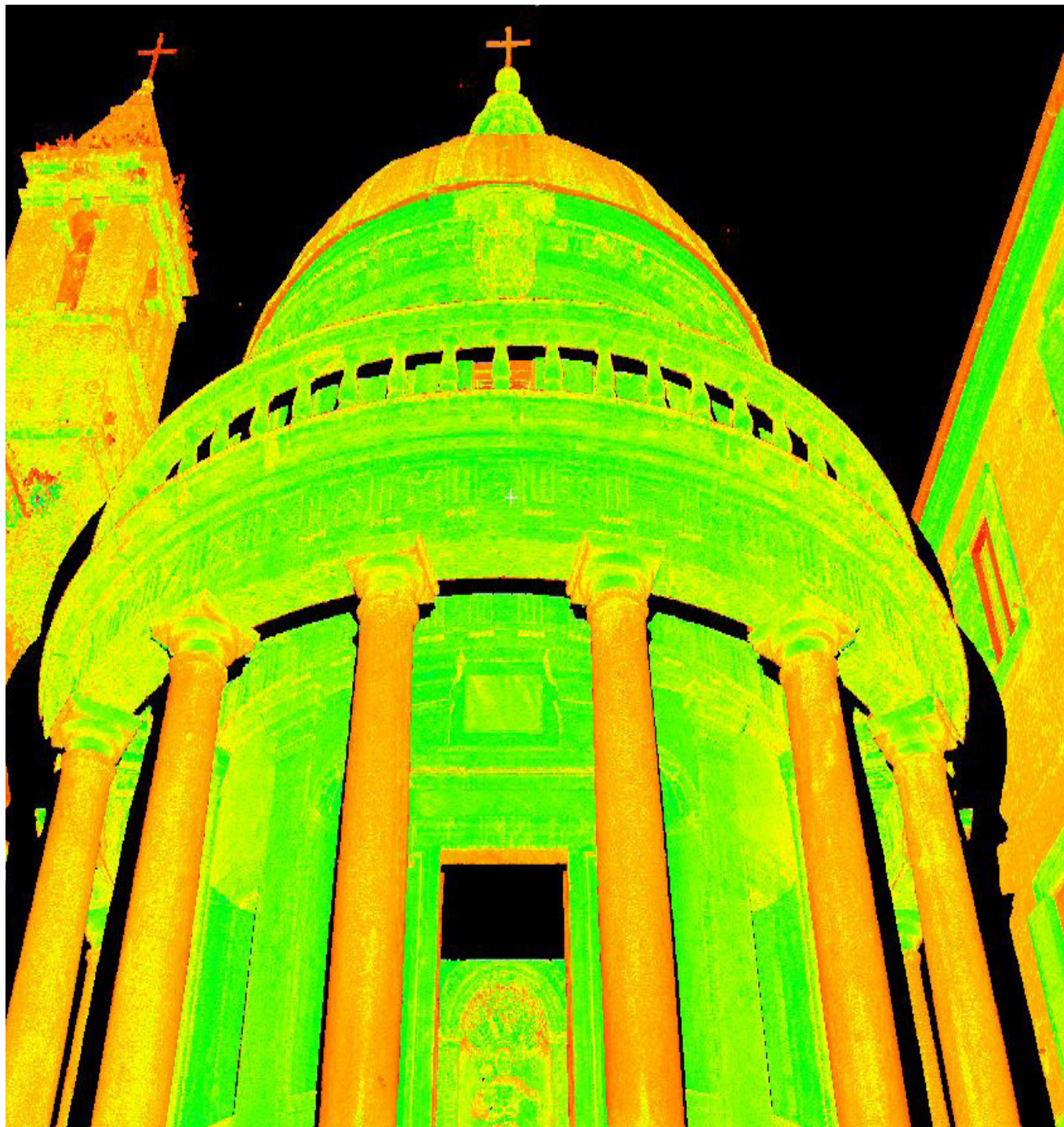


Fig. 14 –Immagine del Tempietto di San Pietro in Montorio con i dati della riflettanza.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

## **1. Considerazioni generali e approccio metodologico del rilevamento con il laser scanner**

*Livia Fabbri*

### ***NOTE***

1. Vedere anche la classificazione, la riflettanza e le problematiche in: Mario Docci, Diego Maestri, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza 2009
2. Per la classificazione e funzionamento degli strumenti vedere Leandro Bornaz “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione.”
3. Per approfondimenti sulle problematiche degli strumenti vedere in: Mario Docci (a cura di), *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell’architettura e della città*, Gangemi, Roma 2011, pp. 58-70





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

## ***2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa; Architettura e dettagli costruttivi; Interventi di modifica, restauro e rilievo***



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

## 2. Il Tempietto di San Pietro in Montorio

L’eccezionalità della realizzazione del Tempietto di San Pietro in Montorio da parte di Donato Bramante fu immediatamente riconosciuta anche dai suoi contemporanei.

Nel terzo de “I sette libri dell’architettura”, del 1537, Sebastiano Serlio disquisiva sulle proporzioni del Tempietto, facendo di quelli che potevano essere ritenuti errori stilistici, dei punti di forza: “[...] e benchè questo tempio paia di troppa altezza, e che ecceda l’altezza di due larghezze: nondimeno in opera per le aperture delle finestre, et de nicchi che vi sono, onde la vista si viene a dilatare, tale altezza non offende, anzi per le addoppiate cornici, le quali girano intorno, che rubano assai dell’altezza, il tempio si dimostra assai più basso ai riguardanti, ch’egli non è in effetto”.<sup>1</sup>

A pagina settantatré della raccolta di biografie “Le vite de’ più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani, da Cimabue insino a’ tempi nostri”, edita nel 1550, Giorgio Vasari commentava il tempio notando come la realizzazione si allontanasse dal progetto originale del Bramante, e scriveva: “Fece ancora a San Pietro a Montorio di treverino nel primo chiostro un tempio tondo, del quale non può di proporzione, ordine e varietà imaginarsi, e di grazia il più garbato né meglio inteso; e molto più bello sarebbe se fusse tutta la fabbrica del chiostro, che non è finita, condotta come si vede in un suo disegno.”<sup>2</sup>

Ne “I quattro libri dell’architettura”, Palladio lo elogia per essere stato il primo a recuperare l’architettura degli antichi: “[...] l’Architettura [...] lasciata la sua primiera bellezza, & venustà andò sempre peggiorando fin che non essendo rimasa notitia alcuna delle belle proportioni, e della ornata maniera di fabricare, si ridusse à tal termine, che à peggior non poteva pervenire [...] Bramante huo-

mo eccellentissimo, & osservatore de gli Edificij Antichi fece bellissime Fabriche in Roma [...] Conciosia adunque che Bramante sia stato il primo à metter in luce la buona, e bella Architettura, che da gli Antichi fin’à quel tempo era stata nascosa, m’è paruto con ragione doversi dar luogo fra le antiche alle opere sue [...] Questo Tempio è di opera Dorica così di dentro, come di fuori. Le colonne sono di granito, le base, & i capitelli di Marmo, il rimanente tutto è di pietra Tiburtina. Io ne ho fatto due tavole.”<sup>3</sup> (libro IV, capitolo XVII).

Dunque, nonostante corresse il rischio di essere ritenuta “un’opera minore”, soprattutto per le sue dimensioni e i limiti del contesto ambientale in cui venne realizzato, il Tempietto ebbe grande fortuna critica e di fatto ebbe una forte influenza, diretta o indiretta, su molte opere architettoniche successive.

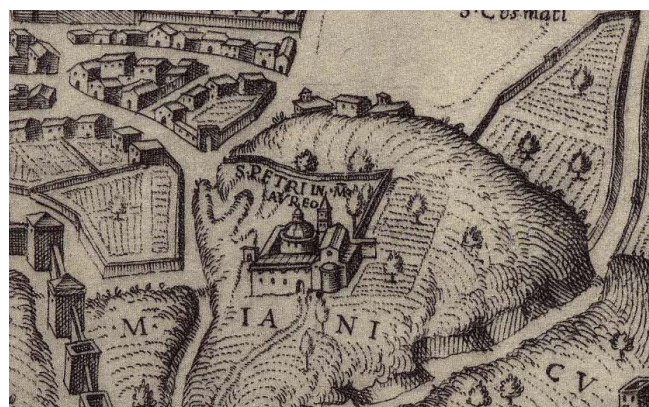


Fig. 15 – tav. 0245.(pianta CXXVI,7-Sec.XVI-1576-Roma di M. CARTARO(grande), dettaglio del complesso conventuale



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

### 2.1 Storia

Il Tempietto<sup>4</sup> oggetto di studio sorge sul Gianicolo, il monte aureo dei romani (così chiamato per i giacimenti di sabbie aurifere), all’interno del complesso conventuale di San Pietro in Montorio, dove la tradizione vuole sia stato crocifisso San Pietro. (Fig.15)

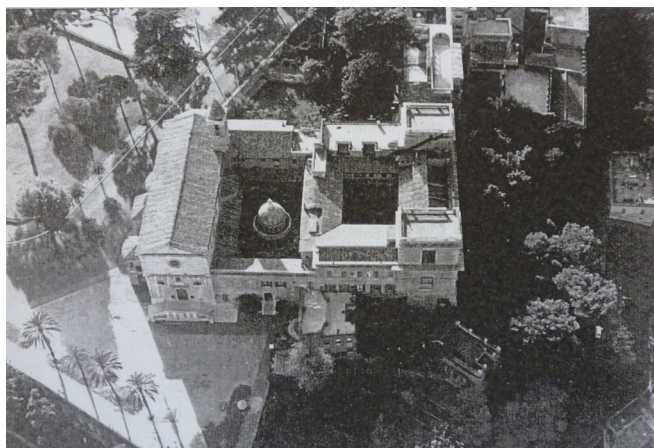


Fig. 16 – Veduta aerea del complesso di San Pietro in Montorio, Iccd, aerofototeca 1960, f. 150, neg. 12-730.

Il luogo conosciuto con la denominazione “in Montorio” si trova sul versante del Gianicolo che si affaccia sulla riva destra del Tevere, nel rione Trastevere (Fig.17). Proprio per la sua posizione geografica, il Gianicolo divenne sin dall’antichità una naturale barriera difensiva della città di Roma e un importante crocevia di collegamenti da e per la città, soprattutto per la presenza delle principali vie di comunicazione fra Roma e l’Italia settentrionale. Allo stesso tempo, il Gianicolo fu sede di numerosi insediamenti religiosi, tra cui il tempio del dio Giano da cui prende il nome ed è ricordato come il sito di mitiche e illustri sepolture, come quella di Numa Pompilio e dei poeti Ennio e Cecilio Stazio.



Fig. 17 – tav0409.(pianta CLXIXa,13-Sec.XVIII-1748-Roma di G.B. NOLLI-zona Gianicolo, via della Lungara e Giotto, la presentazione di Maria al Tempio, cm. 200 x 185,

A questa sacralità, soprattutto pagana, si aggiunse la tradizione religiosa cristiana che, dal XV secolo – riprendendo quanto sostenuto dall’umanista Maffeo Vegio – riconobbe, proprio su questo versante del colle, il luogo dove l’apostolo Pietro subì il martirio (67 d.C.).

Nel tempo, nell’area del Gianicolo, e più precisamente nei luoghi in cui probabilmente erano esistiti insediamenti templari pagani, sorsero nuclei religiosi cristiani. La presenza di una chiesa e di un piccolo monastero si riscontra perlomeno dal IX secolo .

Proprio il monastero<sup>5</sup>, che nel XIV secolo fu casa di monaci celestini, dopo un secolare abbandono, fu concesso alle cure del frate francescano Amedeo Menez da Sylva da papa Sisto IV (bolla del 16 giugno 1472), affinché venisse riedificato e ampliato (Fig.18).

Al centro del cortile incluso tra il convento e la chiesa, ove il Bramante costruì poi il suo Tempietto, avrebbe dovuto esserci già una “cappella della crocifissione”, della quale però la documentazione d’archivio non fa mai cenno.



Fig. 18 – E.du Pérac, pianta di Roma 1575, particolare.

Il cardinale Bernardino Lopez de Carvajal, che aveva deciso per la sistemazione del cortile e l’erezione del tempietto, conobbe Donato Bramante a Milano nel periodo in cui stava portando a termine la costruzione di Santa Maria delle Grazie.

Reduce dal periodo milanese, vissuto sotto l’egida del cardinale Oliviero Carafa (rappresentante del re di Napoli e del partito spagnolo), Donato Bramante giunse a Roma nel 1499.

Il suo soggiorno romano appare ancora fortemente legato ai committenti spagnoli, come ricorda il Vasari: “trovossi al consiglio dello accrescimento di San Iacopo degli Spagnuoli in Navona”.

Una volta a Roma, la costruzione del Tempietto gli fu commissionata da Re Ferdinando il Cattolico di Spagna, per celebrare quel sacro luogo del Gianicolo in cui, secondo la tradizione, era avvenuto il martirio di san Pietro.

Nonostante l’incertezza degli studiosi sulla precisa data in cui il Tempietto venne eretto, si sa per certo che ciò avvenne durante il pontificato di Alessandro VI.

Le due epigrafi, poste sul fronte dell’attuale altare della cripta, lasciano ipotizzare che la fondazione del Tempietto sia avvenuta nell’anno 1502.

Ma, in realtà, una delle epigrafi fa probabilmente riferimento alla sola cripta (datata 9 giugno 1500, è in memoria della consacrazione della chiesa e dell’altare dedicato al martirio di Pietro). Mentre l’altra (ritrovata nel 1628 durante un intervento di restauro del Tempietto) è relativa al sacello, ed è datata 1502.

In ogni caso, queste date non sono riferibili esattamente alla fondazione del Tempietto.

Non è chiaro, infatti, se indichino una volontà di edificazione dell’opera, oppure la sua vera e propria progett-

tazione, su richiesta espressa del re spagnolo Ferdinando il Cattolico.

La tesi più accreditata è che tale data sia da ricondurre alla realizzazione della sola cripta, che, di fatto, presenta un diametro maggiore della cella sovrastante.

Più probabilmente, Donato Bramante progettò il Tempietto in un periodo compreso tra il 1508-09 e il 1512 circa, negli anni tra la realizzazione del Belvedere vaticano e la progettazione di San Pietro.

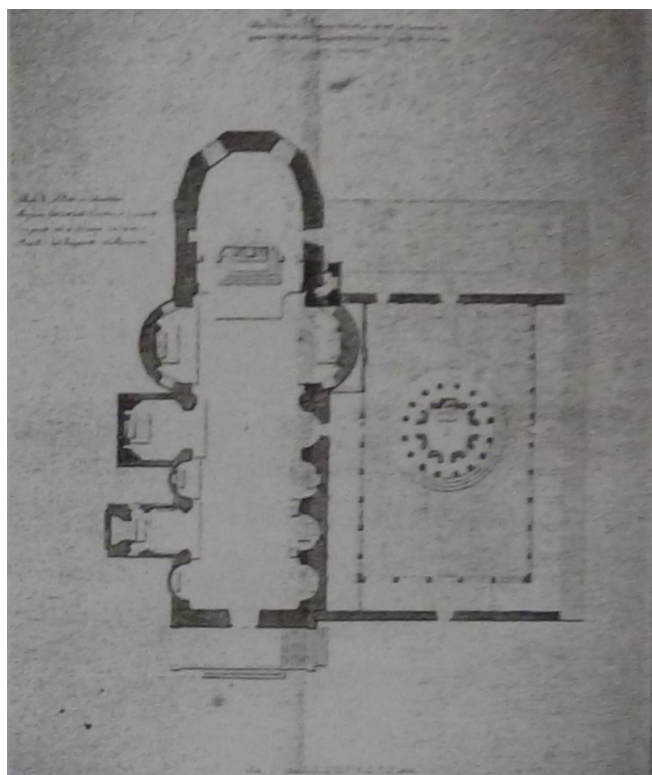


Fig. 19 – V. Vespignani, pianta della chiesa e del chiostro 1870

## 2.2 Teologia e simbologia religiosa

Fin dalla sua progettazione, Bramante concepì il tempietto come il martyrium di San Pietro.

Così nella sua configurazione, come nelle sue forme, l’edificio doveva costituire la rappresentazione di un preciso tema: la celebrazione di Pietro come pontefice romano e allo stesso tempo quella di Roma come sede dell’Apostolo. Considerando il tempio come pura rappresentazione del sacro, la sua forma doveva farsi simbolo della natura del Dio supremo da venerare.<sup>6</sup>

Già in epoca paleocristiana, i luoghi volti alla commemorazione degli eventi sacri (martyrium), erano spesso edifici a pianta centrale (si pensi alla somiglianza del Tempietto col tempio di Portuno a Porto, Fiumicino – fig. 29, o con quello della Sibilla presso Tivoli) (Fig.20).



Fig. 20 – Tempio Portumno a Porto



Non è quindi da considerare arbitraria, o legata soltanto a una preferenza dell’architetto, la scelta del tipo di periptero rotondo, per il tempio dedicato a San Pietro sul Gianicolo.

Il Bramante volle quindi tradurre la presenza del Nostro Signore nell’individuazione di un nucleo centrale. Il centro come punto assoluto, fisso, fondatore del nostro cosmo. Da questo concetto deriva l’identificazione del tempio a pianta centrale, in cui tutti gli elementi si organizzano secondo una stretta simmetria polare e gerarchicamente attorno al centro, visto come origine e fine della composizione.

“Notissimo che il cerchio, nell’Umanesimo Rinascimentale, sia il simbolo del cosmo armonico e dello stesso Dio autore dell’ordine dell’universo” (nota 6).

Il cerchio assumeva evidenti implicazioni sacre e religiose. Già con Leon Battista Alberti e Francesco di Giorgio Martini, l’impiego del cerchio nell’edificio sacro veniva teorizzato come mezzo per esprimere e imitare, attraverso l’architettura, l’assoluta realtà divina.

La concezione di Palladio, forse più di ogni altra, appare pertinente al tempietto di San Pietro: “I piccoli templi che noi facciamo, devono somigliare a questo grandissimo tempio, l’universo, dalla sua immensa bontà divina, con una sua parola perfettamente compiuto”.

Pertanto, l’edificazione da parte del Bramante di un tempio a pianta circolare, espressione concettuale e visiva della “figura del mondo”, può in un certo senso far parte di quella ricerca di un modello di rappresentazione della realtà divina e del cosmo che coinvolse tutti gli architetti del Rinascimento.

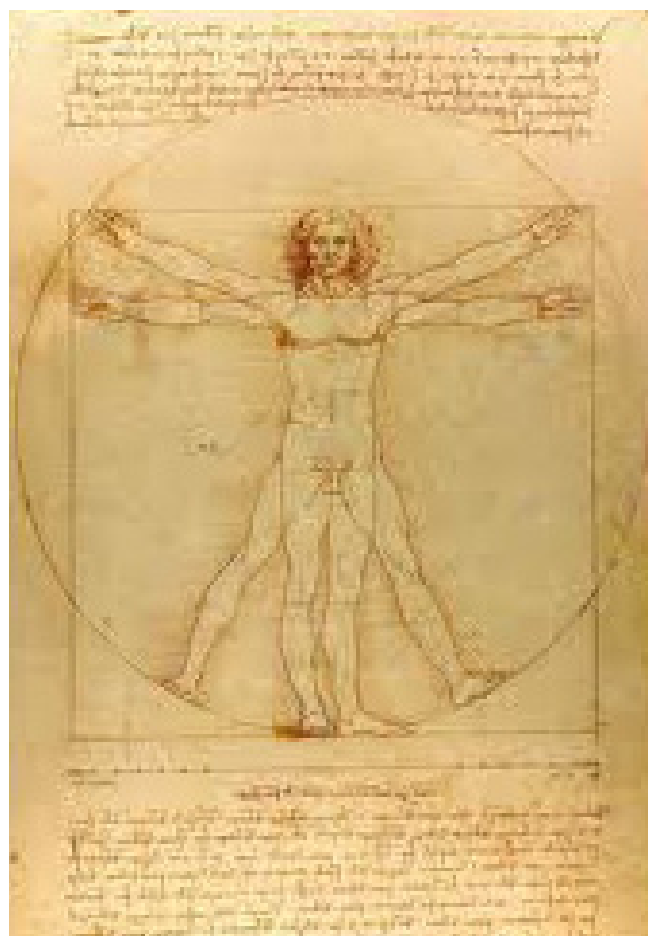


Fig. 21 – Leonardo da Vinci, *Homo ad quadratum*.

Nel caso del Tempietto di San Pietro in Montorio, la circolarità è esasperata nella concezione del progetto complessivo che si risolve in una serie di cerchi concentrici a partire dalla pavimentazione interna, fino al portico del cortile mai realizzato.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

Tali fermenti culturali, cui non era estraneo il neoplatonismo, portarono a concepire a pianta centrale il più grande tempio della cristianità, la basilica di San Pietro in Vaticano, nel cui progetto Bramante potrebbe aver ripreso alcuni elementi dal tempietto e in particolare la cupola.

Questo passaggio tra il molto piccolo del Tempietto e il colossale del Pantheon e di San Pietro, rivela il carattere concettuale del piccolo sacello, i cui caratteri architettonici sembrano peraltro motivati da precisi valori simbolici legati alla figura del santo.

La sperimentale realizzazione di Bramante trova un parallelo anche in alcune opere pittoriche, tra cui il contemporaneo dipinto di Raffaello, “Lo sposalizio della Vergine”, a riprova dell’importanza del tema del tempio circolare nella cultura rinascimentale.

Tornando al tema della centralità della chiesa cristiana e dell’idea di sviluppo centrifugo da un punto – il luogo dove fu versato il sangue di Pietro – sembra frutto di una scelta consapevole lo sviluppo della struttura del Tempietto come fosse originata da quel punto centrale, per poi espandersi progressivamente in senso orizzontale.

Il tema dell’espansione della Chiesa dal punto della crocifissione dell’Apostolo a tutto il mondo diviene così un simbolo trasparente.

In particolare, il corpo vero e proprio del Tempietto può raffigurare la Chiesa Romana, il portico periferico può alludere al mondo esterno, oggetto di conquista della cristianità, e le quattro cappelle sugli assi diagonali, a loro volta, possono alludere alle quattro parti del mondo.

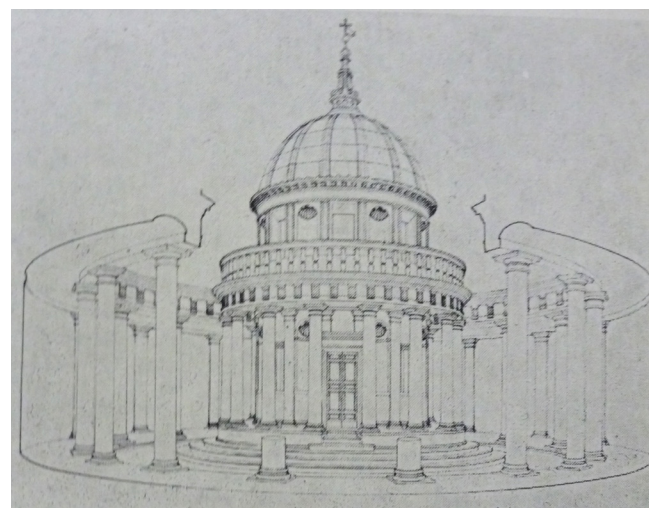


Fig. 22 – P. Portoghesi, ricostruzione del progetto del Tempietto

Il simbolo si fa più chiaro se si osserva il tempietto in elevazione. Un asse verticale passa per il centro geometrico dell’edificio e collega le tre parti nelle quali esso è scomponibile in alzato: la cripta, il corpo con il peribolo dorico, la cupola.

Un ideale movimento di espansione in verticale sembra svilupparsi verso l’alto, dalla terra al cielo, dalla cripta alla cupola. La sua origine è ancora il punto dove sarebbe stata infitta la croce di Pietro.

La tripartizione in verticale suggerisce simboli evidenti, specie se si continua a pensare alla circolarità degli elementi:

-la cripta, buia, scavata nella terra, è la Chiesa originaria e clandestina delle catacombe

-il Tempietto, con la sua zona intermedia, rappresenta la Chiesa contemporanea militante, mentre il portico circolare è il suo abbraccio che accoglie l’umanità. Questa parte del Tempietto, unita allo spazio del cortile scoperto e del portico periferico, può rappresentare la sfera terrestre. La zona intermedia del tempietto e del porticato esterno perimetrale formano lo spazio circolare che simboleggia la Terra

-la zona superiore, costituita dalla cupola e dal tamburo, rappresenta la Chiesa trionfante nella gloria del cielo e allude alla sfera celeste (è noto come la cupola, raffigu-

razione della volta del cielo, rappresenti per estensione Dio stesso)

Anche l’adozione dell’ordine dorico-tuscanico, se si pensa a Vitruvio, ha una valenza simbolica e religiosa, dato che identifica San Pietro come figura “eroica” (Fig.24). Nell’antichità si riteneva, infatti, che il dorico dovesse essere utilizzato nei templi dedicati a divinità maschili (ad esempio Ercole o Marte). È quindi pienamente giustificato in un tempio dedicato a una figura virile come quella di S. Pietro.



Fig. 23 – Modello ligneo del Tempietto di San Pietro in Montorio, Victoria & Albert Museum, Londra.



Fig. 24 – Fotografia di dettaglio dell’ordine dorico-tuscanico esterno ed interno del Tempietto di Donato Bramante.

Il tema simbolico e il significato dell’edificio si specificano e chiariscono ulteriormente se si esaminano i soggetti e la disposizione delle rappresentazioni inserite nelle metope dell’ordine dorico.

Alcuni simboli si riferiscono chiaramente al papato e alla Chiesa di Roma, altri sono attinenti alla fondamentale azione di culto, la messa.

Continuando sull’asse di una corrispondenza simbolica fra elementi architettonici e iconografia sacra, le quarantotto metope (tre per ogni intercolumnio) sono costituite da dodici elementi di diverso soggetto, ciascuno ripetuto quattro volte con varianti e diverse interpretazioni nei particolari.

Le figurazioni delle metope<sup>7</sup> rappresentano una serie di oggetti liturgici (Fig.25):

il calice dell’Eucarestia  
due candelieri  
il vaso per la conservazione dell’incenso  
il vaso per l’olio sacro utilizzato dal vescovo  
la croce gemmata  
le due ampolline della messa per l’acqua e per il vino  
le due chiavi pontificali incrociate  
l’ombrello mezzo chiuso, simbolo del titolo basilicale  
la navicella dell’incenso, simbolo della Chiesa  
il libro  
la croce di S. Andrea  
due spegni candele incrociati

La collocazione dei simboli non sembra seguire un ordine rigoroso, anche se una serie di elementi sono posti secondo una sequenza abbastanza regolare.

Alcuni di essi, poi, ricoprono una posizione chiaramente privilegiata e significativa (ad esempio il calice, in corrispondenza dell’asse d’ingresso principale ).



Fig. 25 – Fotografia di dettaglio delle metope del Tempietto di Donato Bramante.

E ancora, rispetto al rapporto simbolico fra proporzioni architettoniche e numerologia sacra, va rilevato che sul perimetro del Tempietto vi sono sedici colonne (numero che Vitruvio considerava perfetto per via di  $16 = 10 + 6$ , numeri a loro volta perfetti per i pitagorici). Inoltre il sedici è scomponibile anche in  $8 + 8$ , e l’8 è un numero che simboleggia l’infinito, ma anche morte e resurrezione.

La costruzione dell’edificio, poi, è concepita mediante rapporti geometrici<sup>8</sup> ben precisi: l’altezza (compreso architrave, fregio e cornice) è uguale alla distanza da questa alla sommità della cupola; il diametro della circonferenza esterna delle colonne è pari a  $3/2$  del diametro della cupola; la cupola dell’edificio ha un raggio pari alla sua altezza e all’altezza del tamburo su cui si appoggia. In quest’ultimo dato c’è un chiaro rapporto con il Pantheon (nel quale la cupola, anch’essa una semisfera, è alta la metà esatta dell’edificio completo).



### 2.3 Architettura e dettagli costruttivi

Così come oggi possiamo ammirarlo, il Tempietto è un edificio a sé stante rispetto al contesto architettonico delle strutture che lo circondano.

In realtà, come abbiamo già accennato, la sistemazione<sup>9</sup> ideata inizialmente dal Bramante prevedeva che il Tempietto avrebbe dovuto proiettare – in una perfetta simmetria scenica – le sue sedici colonne nelle sedici di un portico del cortile circostante (vedi Terzo Libro delle rappresentazioni di Sebastiano Serlio – fig. 26).

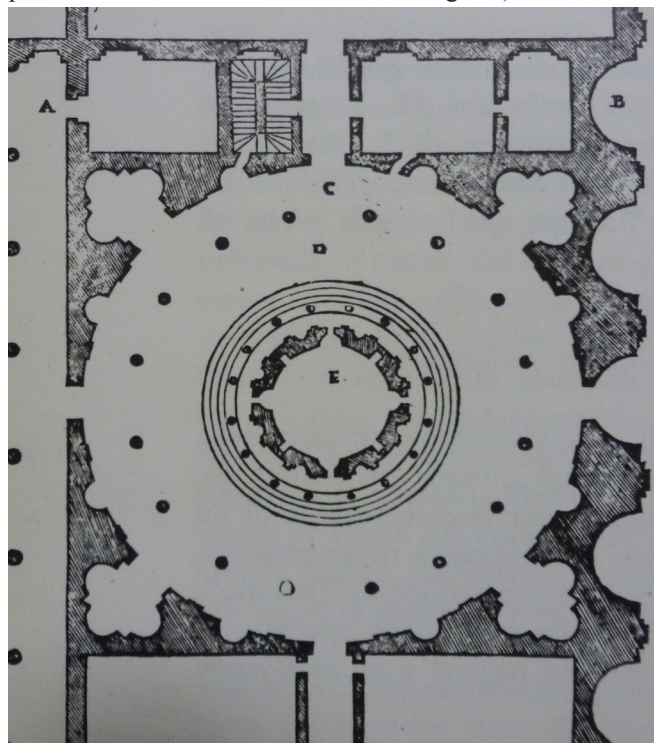


Fig. 26– S. Serlio, *Progetto di San Pietro in Montorio di Bramante*, lib. III c.67

Sedici, perché il numero quattro e i suoi multipli rappresentavano per il Bramante il numero che doveva fare da riferimento per tutta la struttura, divisa in quattro spazi:

- la cella
- il suo peribolo a colonne
- lo spazio scoperto
- il portico anulare esterno

In tal modo, il Tempietto e la struttura anulare del portico avrebbero esaltato la centralità del luogo del martirio di San Pietro.

Dunque, il progetto che portò alla realizzazione del Tempietto era diverso da quello originario (c'è da rilevare, inoltre, che il Vasari accenna all'esistenza di un porticato tutto intorno al tempietto con segmenti di diversa lunghezza, che a oggi appare tamponato).

Fra le opere del periodo romano del Bramante, è una delle poche pervenuteci in larga misura indenne da successivi e deformanti interventi.

Tuttavia, il confronto dell'opera attuale con le sue rappresentazioni cinquecentesche ci permette di ricostruire l'aspetto originario e individuarne le trasformazioni.

Osservando il Tempietto, ci accorgiamo che la rigorosa impostazione geometrica dell'insieme delle componenti architettoniche è densa di significati simbolici.

Notando la planimetria del cerchio iscritto in un quadrato, è impossibile non fare a riferimento alla figura vitruviana dell'“homo ad circulum e ad quadratum”, segno rappresentativo dell'architettura del secondo Quattrocento.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

Visti in pianta, gli elementi del Tempietto sono disposti secondo un sistema di proporzionamento che utilizza un reticolo di quadrati e delle rispettive diagonali.

Il numero quattro si ripete nelle cappelle, inserite agli angoli del quadrato secondo i suoi assi diagonali.

I rapporti geometrici fra gli elementi non sono rispettati solo in senso orizzontale, ma anche in quello verticale, costituendo un armonico microcosmo che replica la concezione umanistica dell’universo.

Il riferimento all’architettura classica è evidente: si possono infatti cogliere sia l’influenza di templi romani quali il Tempio di Vesta a Tivoli, il Tempio di Vesta nel Foro e il Tempio di Ercole Vincitore a Roma (anch’esso creduto un tempio dedicato a Vesta), sia di modello paleocristiano (generalmente utilizzati come martirio), come il mausoleo di Santa Costanza e la basilica di Santo Stefano Rotondo. Un altro possibile riferimento di edificio sacro a pianta circolare forse utilizzato da Bramante fu il Pantheon.

Probabilmente, una volta stabilito lo schema d’insieme, il Bramante era pronto a dedicarsi alla definizione dei suoi elementi per deduzione dall’idea di partenza, e per scomposizione del problema in parti.

Ma è proprio a questo punto, forse, che affiorarono vincoli pratici e contraddizioni, mettendolo nelle condizioni di dover modificare parte dei piani originali.

Il Tempietto si presenta come un edificio monoptero-periptero, dato il colonnato esterno che circonda il corpo

cilindrico che costituisce la cella del tempio.

La muratura della cella è scavata da nicchie insolitamente profonde ed è scandita da paraste come proiezione delle colonne del peristilo.



Fig. 27 – San Pietro in Montorio di Bramante, fotografia d’insieme.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

La costruzione è, infatti, circondata da un colonnato dorico sopraelevato su gradini. Sulle colonne corre una trabeazione conforme alle indicazioni vitruviane, con un fregio decorato con triglifi e metope.

I materiali utilizzati sono:

- granito grigio per le colonne
- travertino
- intonaco
- gesso
- marmi

L’interno della cella ha un diametro di circa 4 metri e mezzo, più un “naos”, uno spazio dedicato alle funzioni liturgiche, un luogo puramente simbolico e commemorativo.

La forma cilindrica è in qualche modo trasformata da alte e profonde nicchie, quattro delle quali ospitano piccole statue degli evangelisti. Sull’altare è collocata una statua di San Pietro di anonimo lombardo. Il pavimento è a tessere marmoree policrome, nello stile cosmatesco, che a fine XV secolo fu oggetto di un certo revival.

L’edificio è coperto da una cupola, restaurata in più di un’occasione, progettata in conglomerato cementizio e posta su un tamburo ornato da lesene, a formare un ordine sovrapposto a quello delle colonne.

Il rivestimento in piombo, probabilmente presente fin dalla costruzione, è stato ripristinato nel XX secolo, in quanto nell’Ottocento il materiale prezioso era stato depredato per essere sostituito da tegole laterizie.

Originariamente, l’accesso alla cripta avveniva probabilmente attraverso una botola o a un altro accesso che, pur

non essendo stato ancora identificato, dovrebbe essere stato ubicato nel punto in cui risiede l’altare della cella. Ma nel XVII secolo tale accesso fu facilitato da scale esterne.

Passiamo ora a identificare, nel dettaglio, dimensionamento e collocazione nello spazio degli elementi costruttivi, in relazione alle scelte architettoniche che il Bramante ha operato per far fronte ai problemi sorti sul suo percorso.

Posizione e dimensione di ogni singolo elemento (vuoto o pieno) si sarebbe dovuta desumere da un insieme di assi che si irraggiavano a partire dall’epicentro del Tempietto. Le misure dei vari elementi avrebbero così potuto essere in relazione l’una con le altre: una volta stabilite le dimensioni di un solo piedritto, ad esempio, si sarebbero potute calcolare quelle di tutti gli altri.



*Fig. 28 – Fotografia di dettaglio dell’ordine dorico e del piedistallo del Tempietto di Donato Bramante.*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

Un rapporto di ferrea correlazione geometrica sia in pianta che in alzato.

L’effetto ottico ricavabile da questa concezione sarebbe stato molto potente: da qualsiasi posizione del chiostro, un osservatore avrebbe associato le colonne doriche del Tempietto a quelle, di dimensioni maggiori, del portico circolare, avvertendo la sensazione che il Tempietto fosse più lontano (o più piccolo) di quanto fosse in realtà.

Va rilevato, però, che per ottenere effetti come quello sopra indicato, rispondendo al principio dettato dalla proiezione dei raggi tangenti, fra le dimensioni delle colonne del portico e del Tempietto e le corrispondenti paraste si verificarono delle discrepanze.

Ciò avrebbe determinato misure in contrasto con quei principi del proporzionamento geometrico che idealizzano la parasta come ideale proiezione (dall’infinito) della



Fig. 29 – Fotografia di dettaglio del portale del Tempietto di Donato Bramante.

colonna, quindi di larghezza uguale al diametro della colonna corrispondente.

Il risultato logico di tale metodo avrebbe dovuto essere l’aumento della larghezza del piedritto, ma all’aumentare dell’interesse la deformazione della proporzione delle parti diveniva visibile, a causa dell’obbligo di mantenere costante l’altezza dei piedritti e delle pareti corrispondenti.

La scelta operata dal Bramante, a questo punto, fu quella di replicare sulla superficie cilindrica della cella paraste di uguali dimensioni a quelle delle colonne dell’ordine esterno, disinteressandosi del principio che detta l’esistenza di precise proporzioni fra colonne e intercolumnio.

Cosa che sarebbe apparsa impossibile, perché mantenere la larghezza dei fusti di colonne e paraste costante, in un sistema di superfici parallele e concentriche, piuttosto che piane e parallele, non permette che resti costante anche l’intercolumnio.

Problema che il Bramante risolse con un’accentuata (e poco canonica) rastremazione delle paraste, così da correggere le differenze fra gli interassi del peribolo, tenendo conto del fatto che, rispetto all’osservatore, gli interassi più stretti sono su un piano più lontano di quello del peribolo esterno.

La non conformità a quelli che in architettura dovrebbero essere principi universali, si nota anche nel posizionamento dei vuoti (porte, finestre e nicchie) sulla parete della cella, fittamente suddivisa dalle paraste. I vuoti risultano quasi schiacciati dalle paraste in senso verticale e gli interspazi fra vuoti e piedritti sono minimi.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri



Fig. 30 – Fotografia del chiostro di San Pietro in Montorio dove è situato il Tempietto di Donato Bramante.

Esempio lampante di soluzioni che contraddicono le regole, è l’inserimento della porta di accesso al Tempietto. Non ci sarebbe stato spazio sufficiente per inserire il vano d’accesso – legato a proporzioni antropometriche non modificabili – fra le paraste. L’unica soluzione era quella di spezzarne la continuità con la mostra della porta.

Un elemento di rottura della scala di misura su cui si basa l’intero edificio, reso accettabile dal fatto che la porta si poteva considerare posta su un piano prospettico avanza-

to rispetto al piano della parete cilindrica, cosa in linea con il principio rinascimentale di strutturazione prospettica degli elementi della parete.

Ma il Bramante fu costretto ad abbandonare a contraddire le regole di strutturazione geometrica anche all’interno della cella, dove, mantenendo la posizione degli interassi delle paraste secondo i sedici assi radiali dei pieni, le paraste interne non avrebbero potuto, di fatto, corrispondere alle dimensioni di quelle esterne (o le esterne ridotte a quasi nulla, o le interne così larghe da occupare quasi tutta la parete).

Il Bramante decise di slegare lo schema di paraste interne da quello esterno e ne costruì otto anziché sedici, di altezza non più corrispondente a quelle dell’ordine esterno e le accoppiò ai lati degli assi diagonali, più strette attorno alle finestre e più lontane dai lati degli assi in croce lasciando così più spazio alle nicchie.



Fig. 31 – Fotografia della cella del Tempietto di Donato Bramante.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

Se per determinare l’altezza del peribolo esterno del Tempietto fu possibile rimanere all’interno di canonici rapporti proporzionali, la copertura dello stesso creò dei problemi.

Rispondendo al modello romano per i templi a pianta circolare, la cupola non si sarebbe mostrata in tutta la sua importanza, lasciando l’edificio in posizione troppo bassa rispetto al portico circostante.

La soluzione più immediata, sollevare il Tempietto su un podio e cerchiarlo di una corona di gradini, era auspicabile ma non decisiva.

L’unica soluzione soddisfacente per il Bramante fu quella di allungare il cilindro della cella, elevandolo fin oltre la trabeazione del peribolo dorico e ponendolo direttamente a sostegno della cupola, frazionando di fatto il volume della cella in due porzioni fortemente diversificate, al di sopra e al di sotto della trabeazione.

Accettando la scomposizione dell’edificio in due piani sovrapposti, occorreva qualificare la superficie del tamburo con l’inserimento di un secondo ordine architettonico (canonicamente proporzionato e proporzionato all’ordine di paraste sottostante).

Ma ogni espediente pareva sciogliere dei nodi architettonici solo per formarne altri.

Per non permettere che la trabeazione dell’ordine del peribolo, posta su un piano più avanzato, oscurasse la base e parte dell’ordine superiore, il Bramante capì che non poteva porre questo secondo ordine direttamente sopra la trabeazione inferiore.

L’inserimento obbligato di un secondo podio giustamente proporzionato che facesse da base al secondo ordine, avrebbe senza dubbio alzato eccessivamente la misura dell’edificio.

E, comunque, due porzioni volumiche separate in due ordini all’esterno, avrebbero contraddetto l’unicità della cavità spaziale interna.

Sopprimendo il tamburo, invece, o limitandone al massimo l’emergenza, oltre il peribolo, l’edificio sarebbe risultato ancora soffocato dal portico anulare periferico, togliendo alla cupola del Tempietto il necessario risalto.

Né l’una, né l’altra ipotesi soddisfaceva i criteri di proporzionamento architettonico cui il Bramante si ispirava.

Una soluzione poteva essere colta in un diverso proporzionamento fra la parte superiore del Tempietto (tamburo e cupola) e quella inferiore (peribolo).

Il rapporto fra le due doveva basarsi sull’assunto che il volume della cella (escluso il portico dal piano di appoggio sul podio del peribolo, fino al vertice dell’estradosso della cupola) doveva essere di proporzioni di 1:2.

Mentre il diametro in pianta del Tempietto (da esterno a esterno delle colonne opposte) avrebbe dovuto essere di proporzioni di 3:4 rispetto all’altezza complessiva dello stesso (dalla base del podio su cui poggiano le colonne, fino al culmine dell’estradosso della cupola).

Ciò avrebbe significato, in prospetto, un rapporto di 3:4 fra larghezza e altezza massima del Tempietto (al netto del lanternino), determinando l’altezza del tamburo in relazione alle altre componenti strutturali (nota 8).

Il problema divenne allora qualificare la superficie del tamburo, per renderla assimilabile al cilindro inferiore della cella, già qualificato da paraste, nicchie e finestre. Così il Bramante articolò il tamburo proseguendo la spanditura verticale dei piedritti e aggiunse nicchie fi-



nestre, anche se, per motivi di altezza, ciò non consentì l’impiego di un ordine canonico proporzionato a quello del cilindro della cella.

Ridusse al minimo la trabeazione, rendendola una fascia liscia coronata da una cornice abbreviata, e rese le paraste semplici risalti della parete, bordate di una sottile riquadratura.

Ora non restava che trovare un raccordo tra parte superiore e parte inferiore, per nascondere l’evidente scarto volumetrico fra le due. La soluzione fu l’aggiunta di una balaustra che cerchiava interamente il tamburo sul piano del peribolo a colonne.

Inutile dal punto di vista funzionale, la balaustra connetteva perfettamente, attraverso la massa traforata, il cilindro della cella al tamburo superiore.

Ciò che maggiormente salta agli occhi, è che la concezione prospettica del Tempietto lo rende simile a un dipinto, la cui essenza morfologica muta a seconda del punto di vista di chi lo osserva.

Accostamento, quello fra opera architettonica e opera pittorica, che può essere rilevato anche per gli effetti di contrasto o di graduazione della luce e dell’ombra ottenuti dalla qualità cromatica e tattile delle diverse superfici.

Così anche per la scelta dei materiali (travertino, marmo, granito, stucco e intonaco colorato, che si amalgamano allo scabro, poroso, liscio, opaco o lucido delle rispettive superfici), che accentuano gli effetti prospettici, presentandosi all’osservatore come un unicum dal tono prevalentemente chiaro.



Fig. 32 – Fotografia del chiostro di San Pietro in Montorio dove è situato il Tempietto di Donato Bramante.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

### 2.4 Interventi di modifica, restauro e rilievo

Nel corso dei secoli, il Tempietto di San Pietro in Montorio ha subito più volte interventi di ripristino e di restauro. Inoltre, data la sua importanza, vi sono stati effettuati successivi progetti di rilievo.

Il primo intervento, risalente al 1605, riguardò essenzialmente la copertura del Tempietto.

Venne formato un anello all’imposta della cupola, e questa stessa fu modificata. Infatti, una nuova calotta venne sovrapposta a quella originaria. Tra la prima e la seconda calotta fu posta un’intercapedine ottenuta con una maglia di mattoni adagiati sulla volta interna, sostenenti la calotta stessa. Durante il rinnovamento della cupola, fu anche inserito l’attuale lanternino.

Nel 1638 venne facilitato l’ingresso alla cripta attraverso l’inserimento di due rampe di scale.

Vennero inoltre aperti gli accessi laterali della cappella superiore, in corrispondenza dei quali, tagliando lo stilobate, furono inseriti due gradini.

In più, la copertura del Tempietto fu rivestita con lastre di piombo.

Al 1804 risalgono gli interventi restaurativi condotti dal Commissario di Antichità e Belle Arti, Carlo Fea. Nel corso di questi lavori il più importante intervento restaurativo è la posa in opera, a protezione della superficie esterna della copertura, di tegole in cotto, che sostituirono il piombo preesistente.

Nel 1810 Giuseppe Marini rappresenta il Tempietto in proiezioni ortogonali, sulla base di un rilievo eseguito



Fig. 33 – 34 – 35 – Fotografia di dettaglio dello stemma, del lanternino e del portone del Tempietto di Donato Bramante, elementi che sono stati soggetti a restauri

dallo stesso autore con le più moderne tecnologie di rilevamento diretto dell’epoca.

Agli anni 1824-1825 risale il restauro ad opera di Giuseppe Valadier, che provvide al ripristino della copertura in piombo, nonché alla posa in opera sulla base dei balastrini e, sul piano di calpestio della balaustra, di uno strato impermeabilizzante.

Durante i restauri del 1977-1978, lo strato impermeabilizzante venne poi rimosso, e furono riportate alla luce le basi dei balastrini.

In seguito al grand tour compiuto fra il 1820 e il suo ritorno in Francia, l’architetto incisore Paul-Marie Leta-rouilly eseguì il primo rilievo modernamente concepito del Tempietto di San Pietro in Montorio.

La rappresentazione completa del suo lavoro si trova in “Édifices de Rome moderne: ou recueil des palais, maisons, églises, couvents, et autres monuments publics et particuliers les plus remarquables de la ville de Rome”, opera edita nel 1840.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

L’ultimo restauro eseguito sul Tempietto riguarda le superfici lapidee e gli intonaci dell’esterno, ed è stato commissionato nel 1998 dall’Istituto de Patrimonio Histórico Español.

La direzione lavori fu affidata agli architetti: Gisella Capponi, dell’Istituto Centrale per il Restauro di Roma; José Sancho Roda e Antonio Sanchez Barriga, del Ministerio de Educación y Cultura, Dirección General de Bellas Artes<sup>10</sup>.

Infine, va registrato il recentissimo rilievo operato dal prof. Manfred Schuller e riportato nel 2010, nel saggio: “Entre relevés et restitutions, le Tempietto de Bramante, Rome, Italie”.

## 2.5 Ricerca iconografica come strumento di conoscenza

L’eccezionalità della realizzazione del Tempietto di San Pietro in Montorio da parte di Donato Bramante fu riconosciuta immediatamente. Infatti gli stessi contemporanei lo citano nei loro testi, accostandolo alle grandi architetture del passato.

Il Vasari nel 1550 ne “Le vite de’ più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani, da Cimabue insino a’ tempi nostri” (pag. 73) commentava il tempio notando come la sua realizzazione fosse diverso a dal progetto previsto da Donato Bramante e scriveva: “Fece ancora a San Pietro a Montorio di treverino nel primo chiostro un tempio tondo, del quale non può di proporzione, ordine e varietà immaginarsi, e di grazia il più garbato né meglio inteso; e molto più bello sarebbe se fusse tutta la fabbrica del chiostro, che non è finita, condotta come si vede in un suo disegno.”

Palladio lo inserisce ne “I quattro libri dell’architettura”, elogiandolo per essere stato il primo a recuperare

l’architettura degli antichi: “l’Architettura...lasciata la sua primiera bellezza, & venustà andò sempre peggiorando fin che non essendo rimasa notitia alcuna delle belle proportioni, e della ornata maniera di fabricare, si ridusse à tal termine, che à peggior non poteva pervenire... Bramante huomo eccellentissimo, & osservatore de gli Edificij Antichi fece bellissime Fabriche in Roma... Conciosia adunque che Bramante sia stato il primo à metter in luce la buona, e bella Architettura, che da gli Antichi fin’à quel tempo era stata nascosa, m’è paruto con ragione doversi dar luogo fra le antiche alle opere sue... Questo Tempio è di opera Dorica così di dentro, come di fuori. Le colonne sono di granito, le base, & i capitelli di Marmo, il rimanente tutto è di pietra Tiburtina. Io ne ho fatto due tavole.” (Libro IV, Capitolo XVII).

Sebastiano Serlio nel 1537, nel terzo libro de “I sette libri dell’architettura”, invece disquisiva sulle proporzioni del Tempietto di San Pietro in Montorio: “e benchè questo tempio paia di troppa altezza, e che ecceda l’altezza di due larghezze: nondimeno in opera per le aperture delle finestre, et de nicchi che vi sono, onde la vista si viene a dilatare, tale altezza non offende, anzi per le addoppiate cornici, le quali girano intorno, che rubano assai dell’altezza, il tempio si dimostra assai più basso ai riguardanti, ch’egli non è in effetto”.

Nel 1810 Marini Giuseppe rappresenta il Tempietto in proiezioni ortogonali sulla base di un rilievo eseguito dallo stesso autore con tecnologie moderne di rilevamento diretto.

In seguito al tempo del Gran tuor nel 1840 Paul Letarouilly esegue il primo rilievo, modernamente concepito del



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

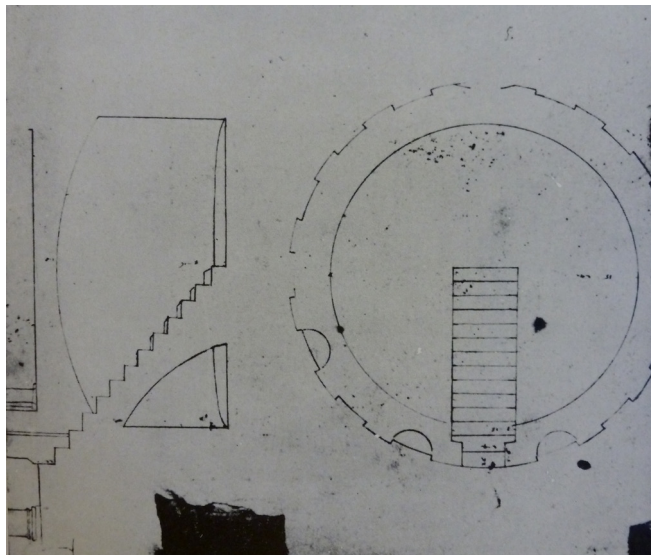
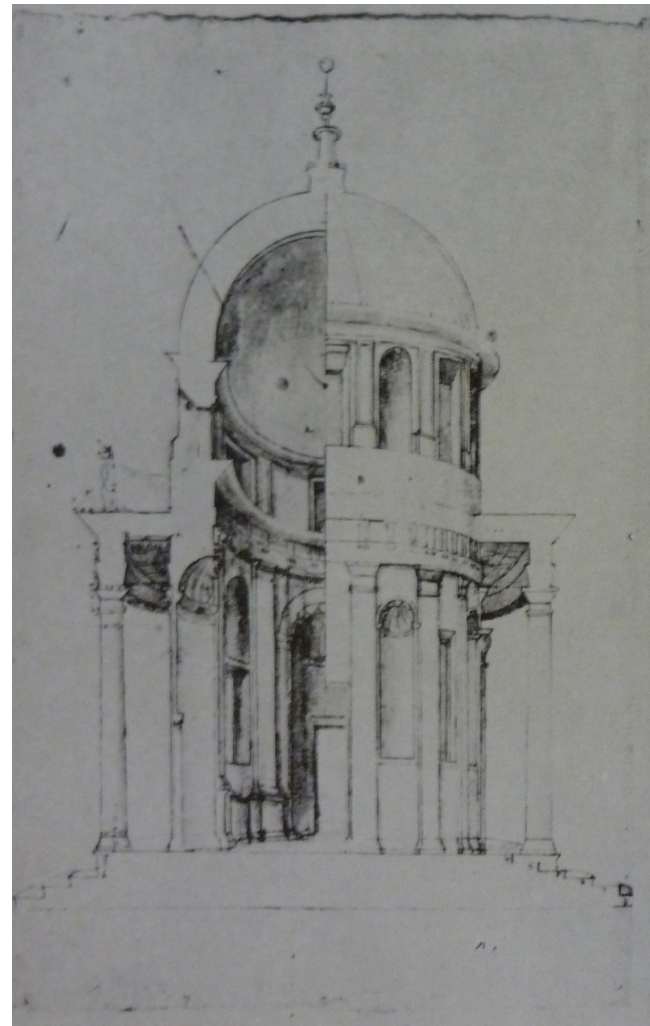
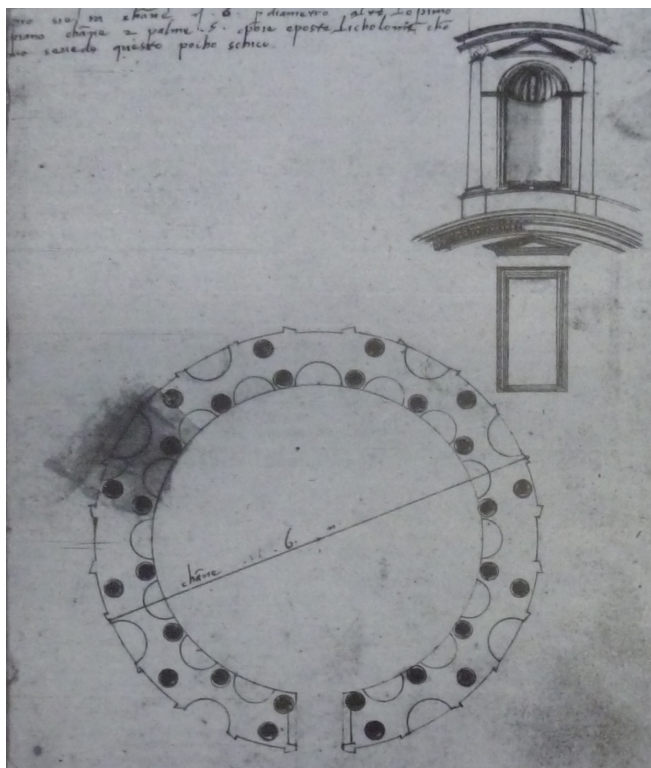


Fig. 36 – Anonimo, Gabinetto Nazionale delle Stampe, Cod. Nr. 32746, foglio 33 v



Tempietto di San Pietro in Montorio e lo troviamo rappresentato in “Édifices de Rome moderne: ou recueil des palais, maisons, églises, couvents, et autres monuments publics et particuliers les plus remarquables de la ville de Rome”.

Fig. 37 – al lato-Anonimo, già attribuito al Bramantino, Biblioteca Ambrosiana, pianta Tempietto

Fig. 38 – sopra, Anonimo, Gabinetto Nazional delle Stampe, Cod. Nr. 32746, foglio 42 r

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

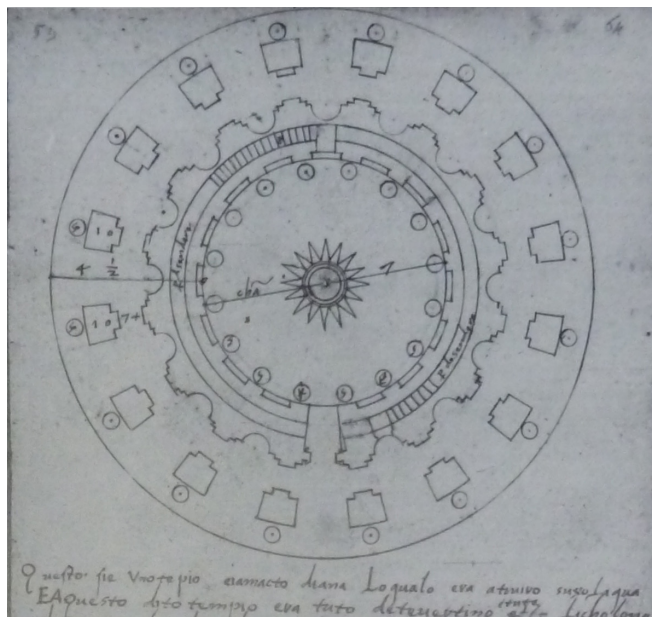


Fig. 39 – Anonimo, già attribuito al Bramantino, Biblioteca Ambrosiana, pianta Tempietto

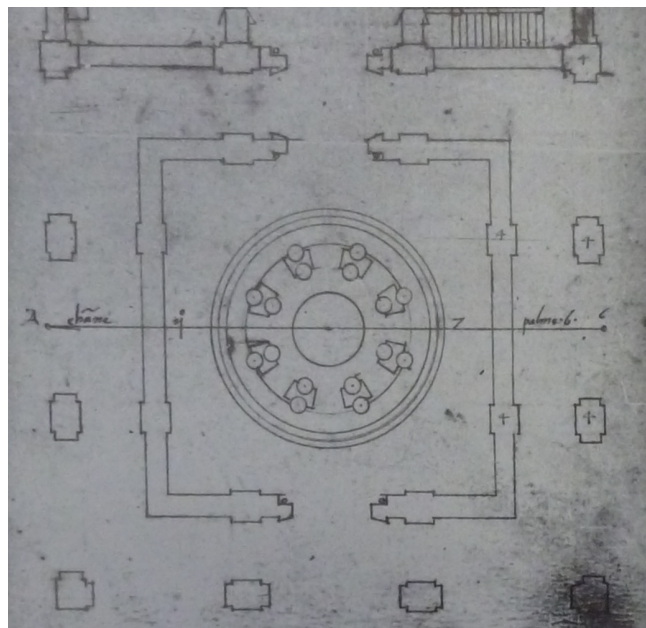


Fig. 40 – Anonimo, già attribuito al Bramantino, Biblioteca Ambrosiana

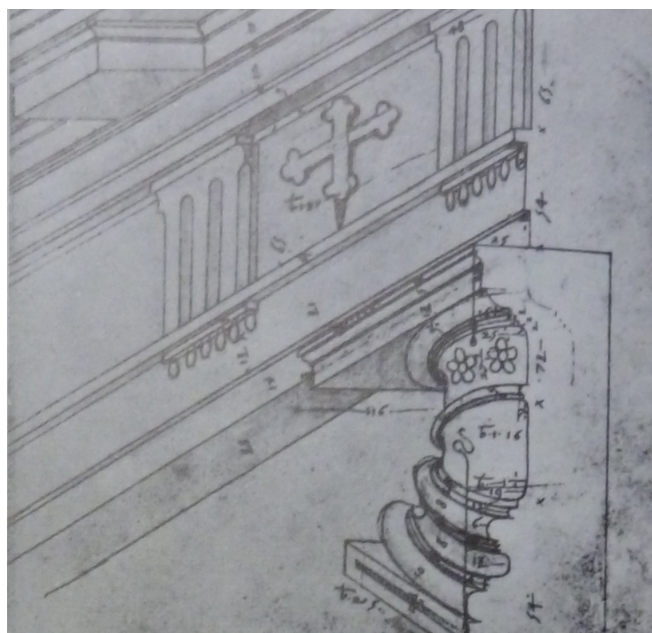


Fig. 41 – Codice Coner, Ordine Dorico del Tempietto, f. 62.

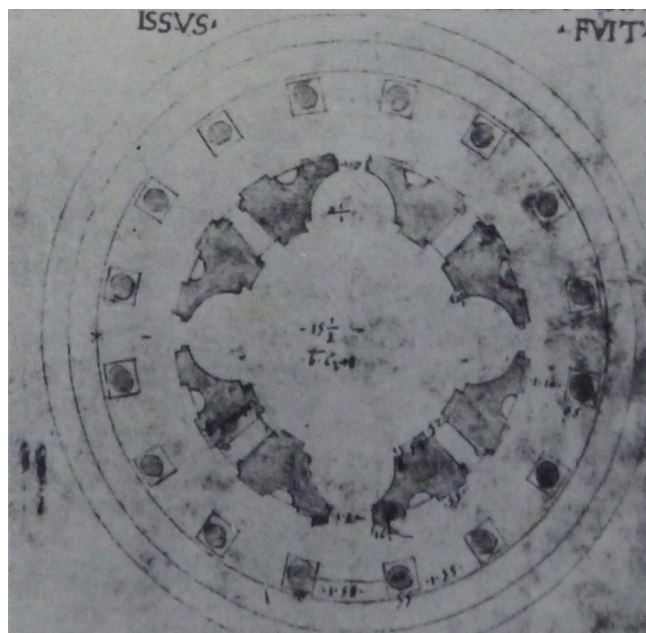


Fig. 42 – Codice Coner, Pianta Tempietto, prima delle trasformazioni



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

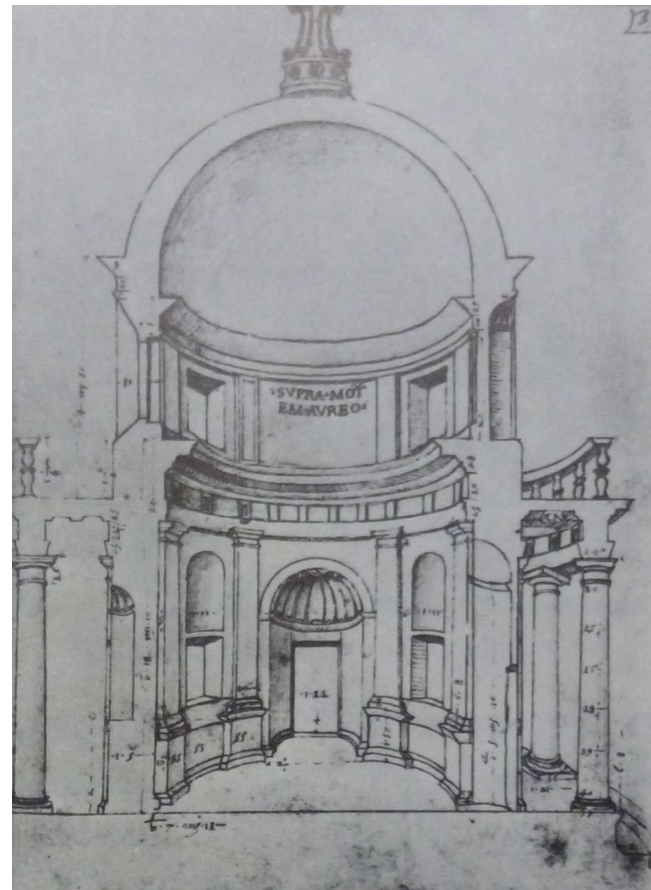


Fig. 43 – Codice Coner; Sezione Tempietto, prima del lanernino



Fig. 44 – in basso a ds Codice Coner, Veduta prospettica del Tempietto f.33

Fig. 45 – in alto a sn Bramante, prospetto del Tempietto, Uffizzi Arch. 135

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

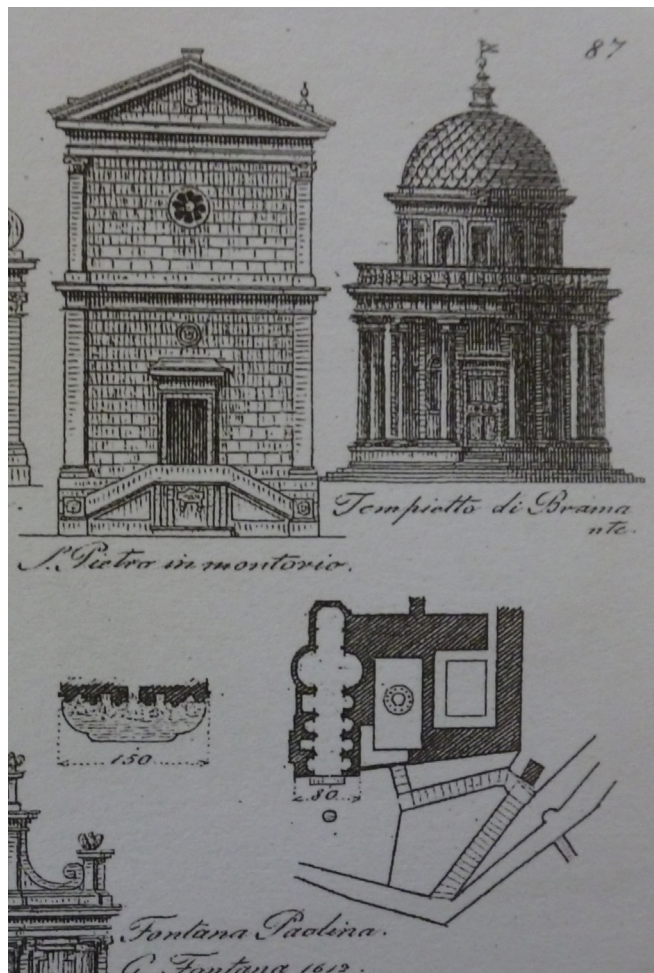


Fig. 46 – G.B. Cipriani, *prospetto e pianta del complesso*, 1835, tav. 87.



Fig. 47 – F. Benoist, *veduta prospettica*, 1870



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempio di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri



Fig. 48 – Giotto, la presentazione di Maria al Tempio, cm. 200 x 185, Cappella degli Scrovegni, Padova, 1303-1305.

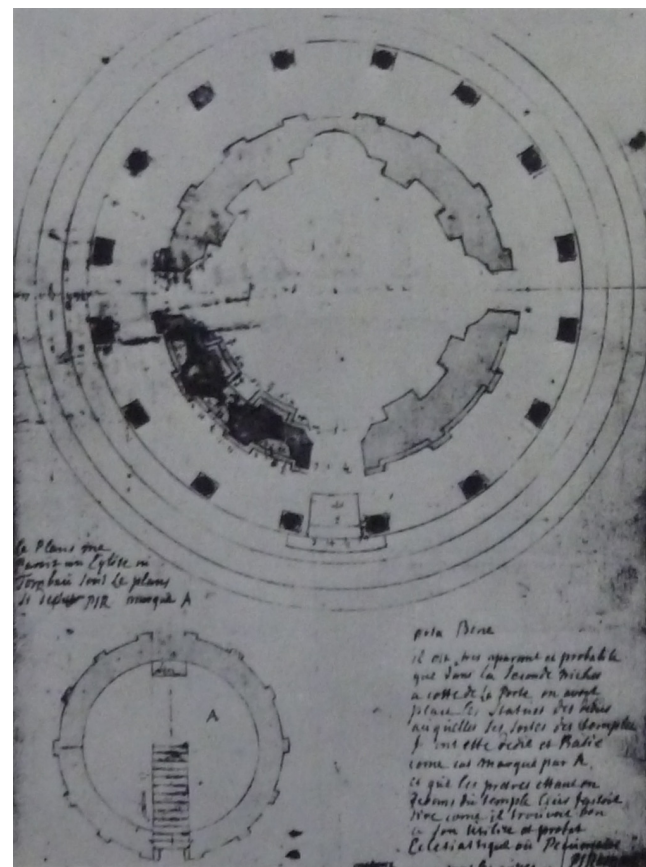


Fig. 49 – Giotto, la presentazione di Maria al Tempio, cm. 200 x 185, Cappella degli Scrovegni, Padova, 1303-1305.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

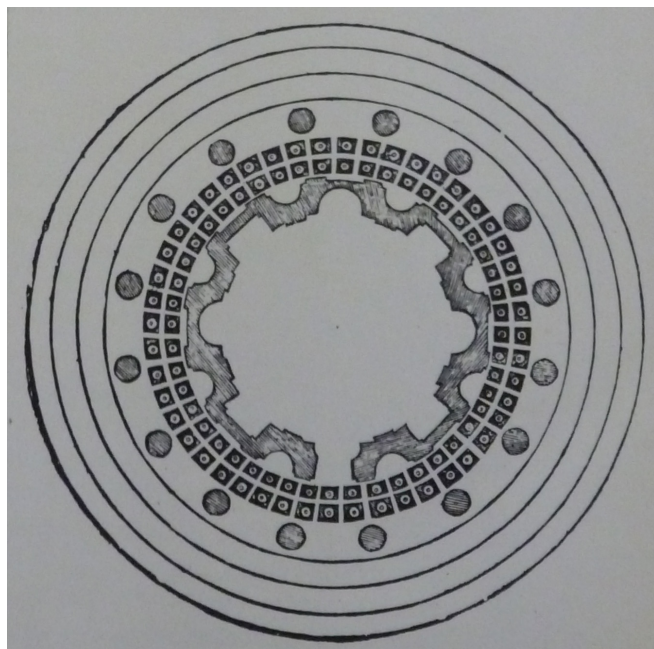


Fig. 50– S. Serlio, *Pianta di San Pietro in Montorio*, Libro III cc. 68

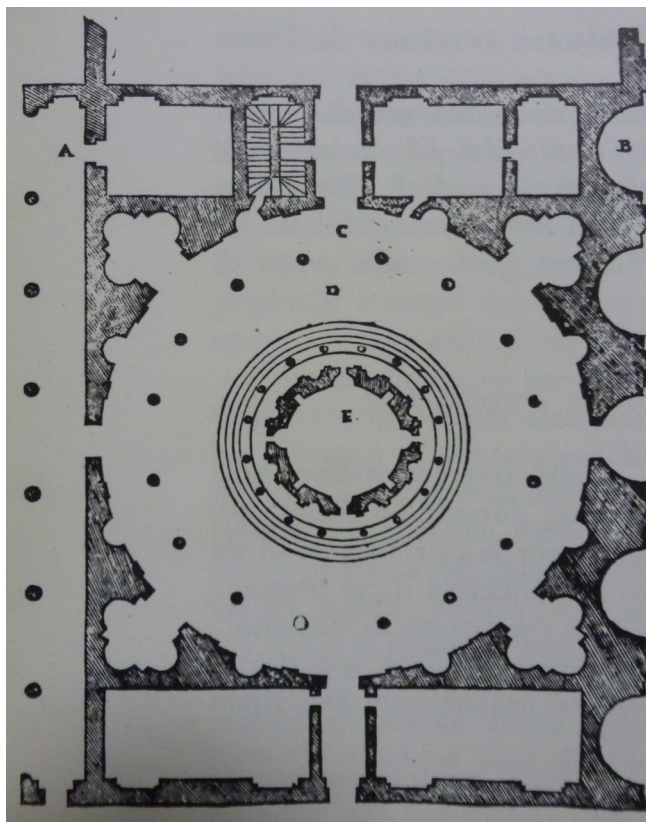


Fig. 51 – S. Serlio, *Progetto di San Pietro in Montorio di Bramante*, lib. III c.67



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

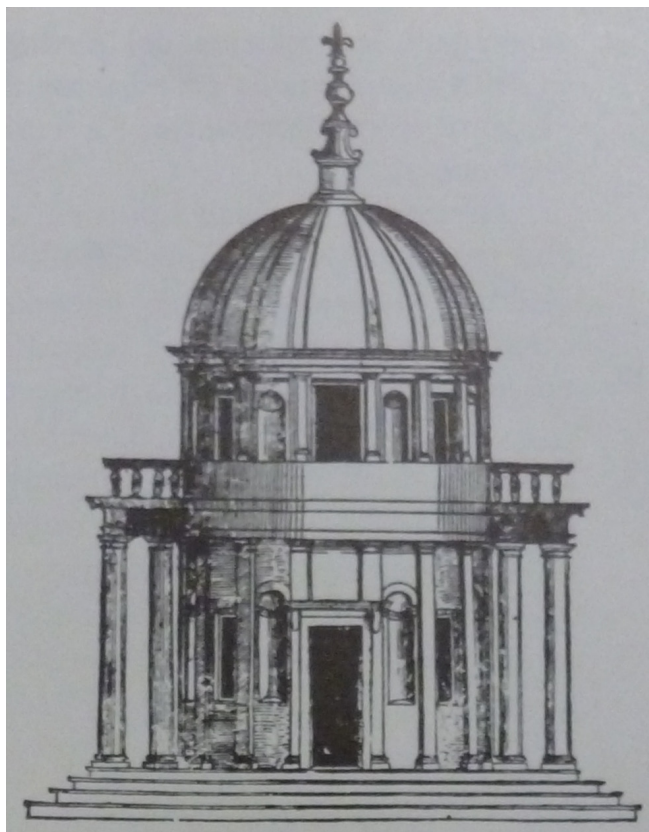


Fig. 52 – S.Serlio, Prospetto di S.Pietro in Montorio, Libro III c.c. 67\_prima edizione



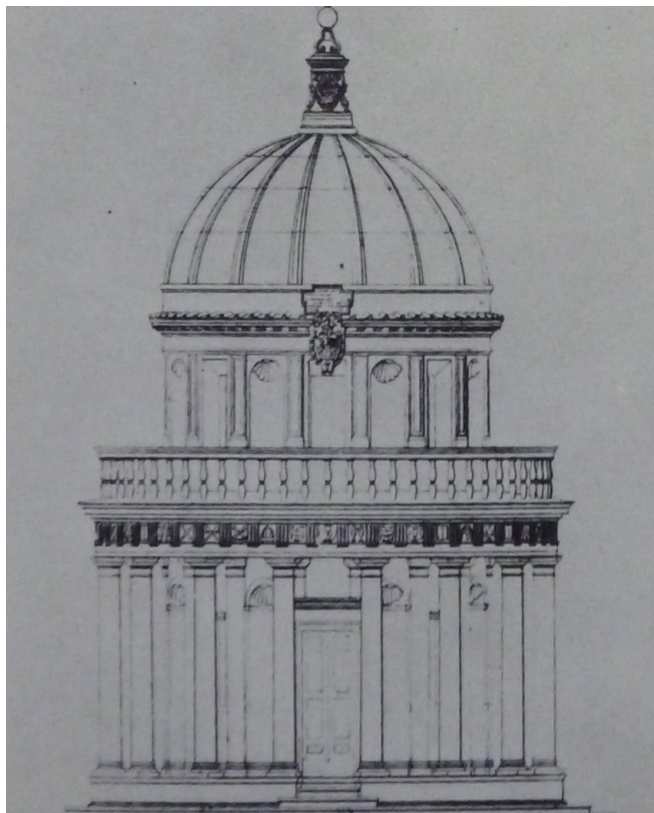
Fig. 53 – S.Serlio, Prospetto di S.Pietro in Montorio, Libro III c.c. 67\_seconda edizione



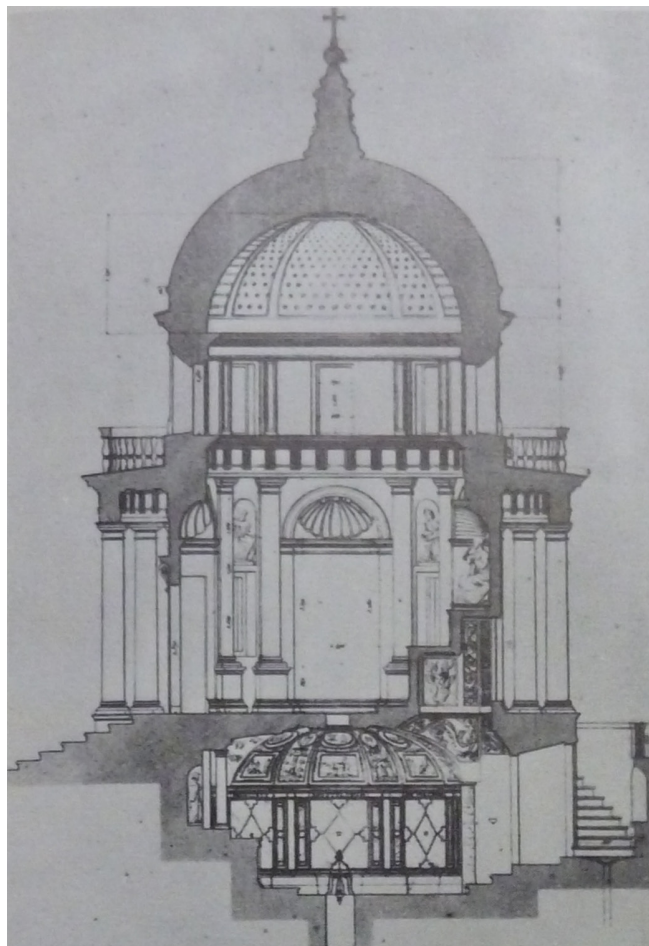


“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 54 – Letarouilly, prospetto Tempietto*



*Fig. 55 – Letarouilly, sezione Tempietto*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri



Fig. 56 – Letarouilly, veduta prospettica del Tempietto

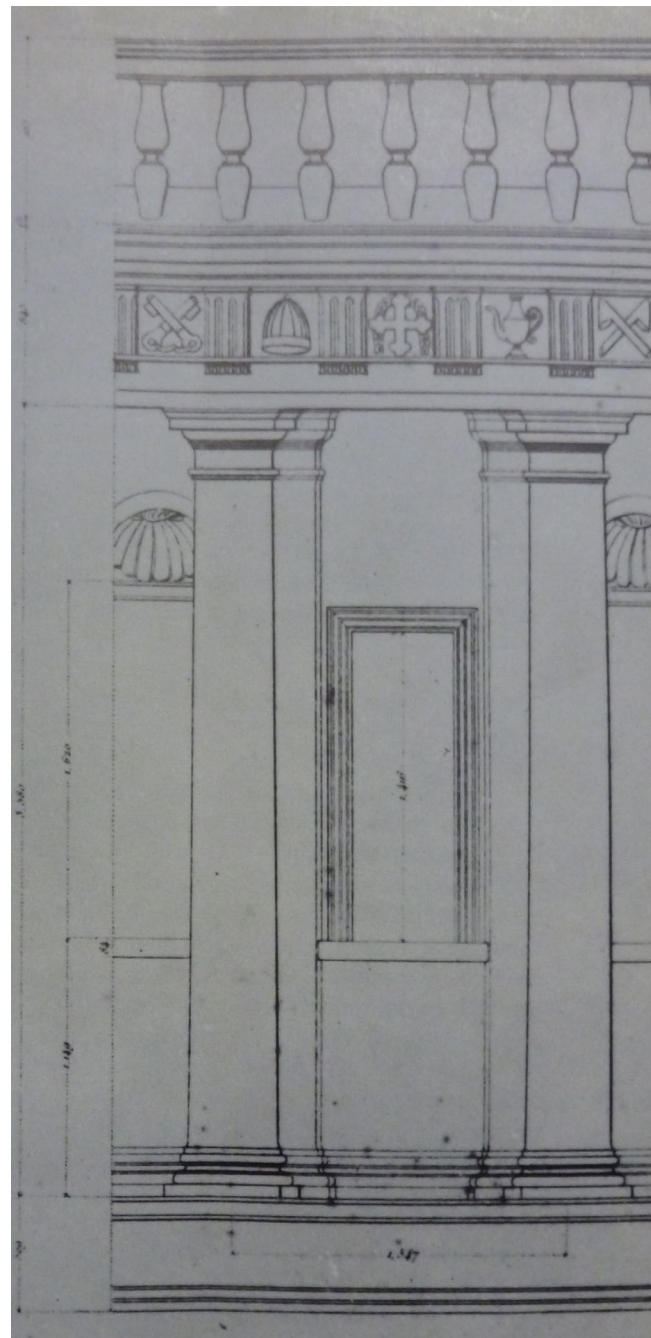


Fig. 57 – Letarouilly, particolare dell’ordine dorico del peribolo del tempietto, manca la restremazione delle colonne





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri



Fig. 58 – Letarouilly, particolare dell’ordine dorico esterno

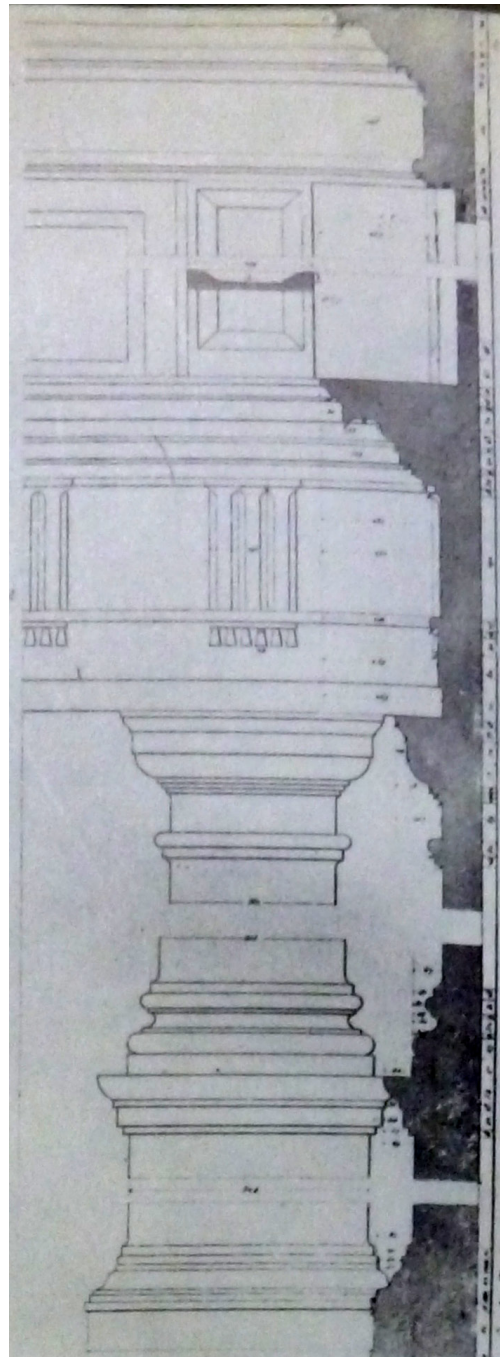


Fig.59 – Letarouilly, particolare dell’ordine dorico dell’interno del Tempietto



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## 2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa

Livia Fabbri

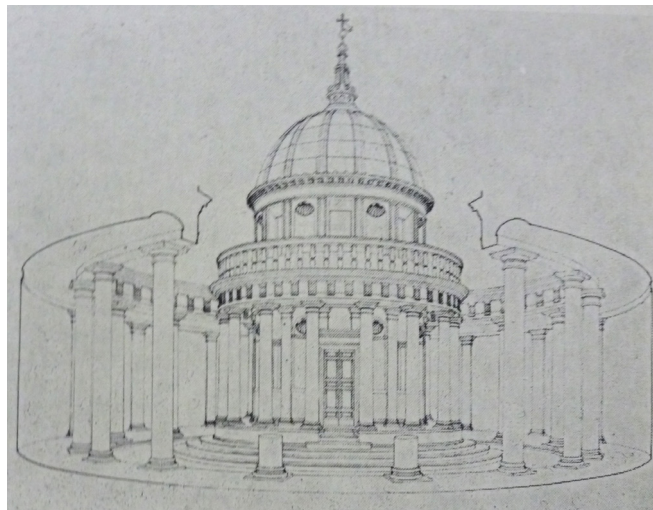


Fig. 60 – P. Portoghesi, ricostruzione del progetto del Tempietto

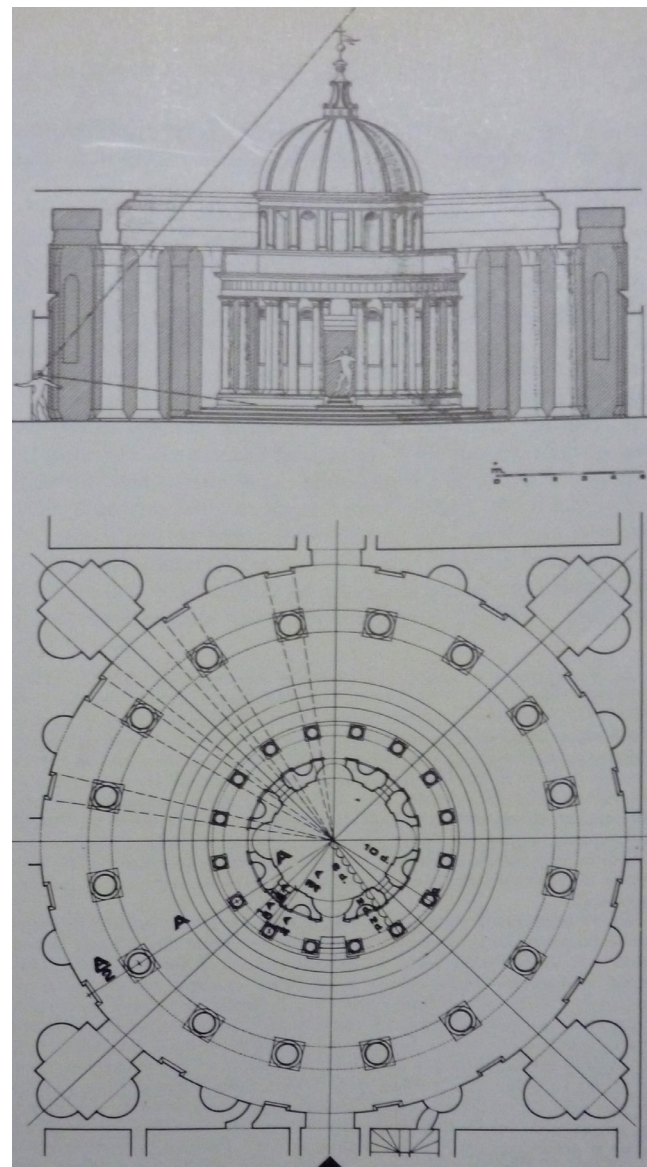


Fig. 61 – Ipotesi ricostruttiva del Progetto di Bramante, disegno di A. Lauri





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

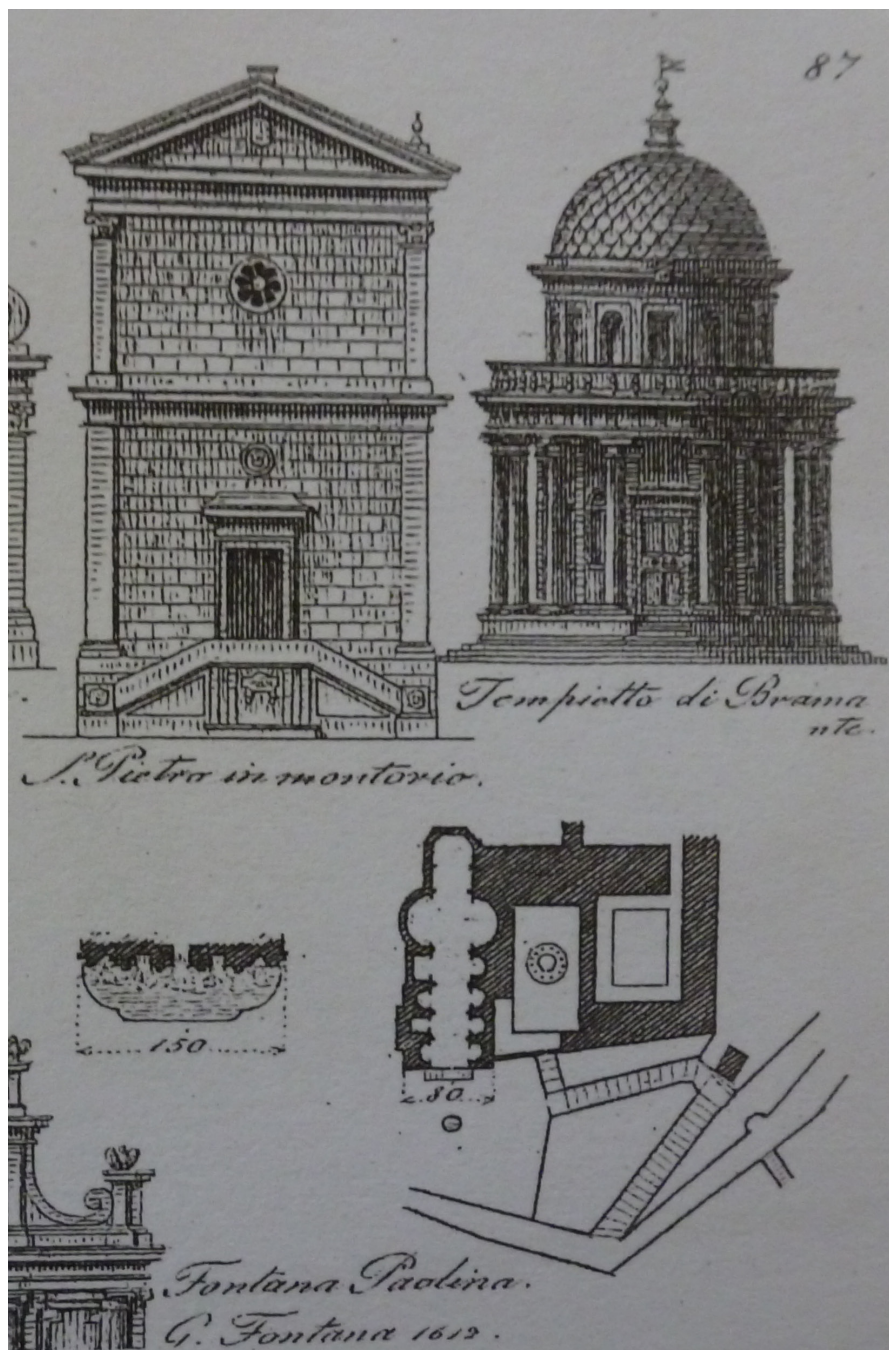


Fig. 61 – G.B. Cipriani, prospetto e pianta del complesso di San Pietro in Montorio, 1835, tav .87





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

## ***2. Il tempietto di San Pietro in Montorio: Storia; Teologia e simbologia religiosa***

*Livia Fabbri*

### ***NOTE***

1. Sebastiano Serlio, Il terzo libro di Sebastiano Serlio bolognese nel qual si figurano e descriuono le antichità di Roma e le altre che sono in Italia, e fuori de Italia, Bologna 1554
2. Giorgio Vasari, Le vite de' più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani, da Cimabue insino a' tempi nostri, Firenze 1550, pag. 73
3. Andrea Palladio, I quattro libri dell'architettura, Venezia 1570
4. Per il capitolo 2.1 si rimanda agli autori presenti nella bibliografia specifica sul Tempietto.
5. Per ciò che concerne il monastero vedere: Flavia Cantatore, San Pietro in Montorio: la chiesa dei Re Cattolici, 2007 Roma
6. Sulla genesi e sull'aspetto teologico: Arnaldo Bruschi, Bramante Architetto, Laterza, Bari 1969 pp. 463-527, 986-1035
7. Fortunato, Giuseppe (2010). “The role of architectural representation for the analysis of the built. The 3d survey of San Pietro in Montorio's temple in Rome”. Acts of X Congreso Internacional expresión gráfica aplicada a la edificación, Alicante, Editorial Marfil
8. Claudio Tiberi, Misure e contemporaneità di disegno del chiostro di S. Maria della Pace e del Tempietto di S. Pietro in Montorio, in Studi Bramanteschi, Roma, 1974 pp. 437-482
9. Per il capitolo 2.3 si rimanda agli autori presenti nella bibliografia specifica sul Tempietto
10. José Sancho Roda, Proyecto de restauración del templete de Bramante, in «restauración & rehabilitación. Revista internacional del Patrimonio Histórico», 17, Madrid 1998, pp. 28-37.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*

### ***3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio***





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

### 3.1 *Problematiche e approccio*

Come accennato nella premessa, la presente ricerca si pone quale obiettivo principale di servire da testimonianza riguardo alle grandi potenzialità messe a disposizione dalla tecnologia laser scanner.

Tale tecnologia costituisce per gli storici dell’architettura una vera e propria rivoluzione nelle possibilità di acquisizione dati, nell’analisi delle misurazioni effettuate sul campo e nella documentazione del patrimonio culturale. Non solo grazie alla possibilità di ottenere rappresentazioni metriche più che attendibili su cui basare le ipotesi di lettura del monumento, ma anche come strumento conoscitivo e di analisi comparativa dei rilievi effettuati in un passato recente e meno recente con metodologie tradizionali, così da verificarne accuratezza e attendibilità.

Proprio a sostegno di questa tesi, la scelta del tema applicativo doveva ricadere su un manufatto che rispondesse a tutta una serie di requisiti:

- 1) grande importanza dal punto di vista architettonico e culturale
- 2) capacità esemplificativa, limitatamente al punto di vista del funzionamento e dell’uso pratico della strumentazione utilizzata
- 3) tipicità del manufatto, dal punto di vista delle intrinseche problematiche architettoniche e ambientali da affrontare nella fase di rilievo
- 4) capacità esemplificativa, limitatamente al punto di vi-

sta della possibilità di superamento di tali problematiche. Sotto tutti questi punti di vista, ovviamente interconnessi fra loro, il Tempietto di San Pietro in Montorio di Donato Bramante si prestava in modo perfetto all’elaborazione di un progetto di rilievo di grande interesse per gli operatori del campo.

Non occorre certo rimarcare l’importanza architettonica e culturale di un monumento quale il Tempietto del Bramante, considerato a ragione uno degli esempi più significativi d’architettura del XVI secolo e, allo stesso tempo, un modello di riferimento per rappresentare quel richiamo alla perfezione delle forme classiche che il gusto rinascimentale evocava.

Portato storico testimoniato dalla vasta documentazione iconografica giunta fino a noi, dalla serie di successivi restauri che hanno interessato il monumento e dal conseguente numero di rilievi eseguiti su di esso nel corso dei secoli.

Ottenere una documentazione che potesse mettere in luce nuovi aspetti architettonici del Tempietto e anche fornire una verifica probante di quanto rispetto a esso era stato rilevato in passato, imponeva l’uso di uno strumento di alta precisione e una particolare attenzione nel suo utilizzo.

Come già accennato, la scelta è ricaduta sul laser scanner distanziometrico di nuovissima generazione della Leica Geosystem, modello C10.

Per ciò che riguarda la tipicità del manufatto, non si può





“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempio di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

non ribadire che la forma circolare, la presenza di colonne che creano molteplici coni d’ombra, la limitatezza dell’area in cui operare il rilievo e infine la necessità di acquisire i dati in orari e giorni in cui l’affluenza di visitatori fosse scarsa o nulla, hanno determinato una serie di problematiche.

Problematiche superate con successo attraverso un’attenta programmazione, una scelta pragmatica e allo stesso tempo di qualità della strumentazione e, soprattutto, di una metodologia di rilievo adatta al caso (in particolare una scansione doppia per l’esterno e una per l’interno del monumento; diverse regolazioni del passo di scansione e grande attenzione nei successivi posizionamenti dello strumento).

#### 3.2 – *Tecnica del rilievo, fase per fase*

Acclarato che le nuove tecnologie di scansione laser non possono sostituire un’attenta e specifica programmazione del rilievo, passiamo a delineare il processo di rilievo del Tempio di Bramante, fase per fase.

##### 3.2.1 – *Prima fase: il progetto di rilievo*

Attraverso sopralluoghi mirati, si è proceduto alla realizzazione degli eidotipi (dal greco: *eidōs* forma e aspetto). Gli eidotipi<sup>1</sup> sono schizzi a mano libera in proiezioni ortogonali, basati su un modulo di proporzionamento a vista, ricavato sulle misure antropometriche del passo (Fig. 62). La fase di sopralluogo è necessaria per prendere conoscenza dello stato di fatto del monumento, affinché si possano eseguire preliminarmente tutte le considerazioni pratiche necessarie per la realizzazione del progetto di rilievo.

Nel caso del Tempio di San Pietro in Montorio, il lavoro preliminare è stato svolto in una sala – messa gentilmente a disposizione da parte dell’Accademia Spagnola – dove sono stati custoditi i materiali utili in fase di rilievo. Attraverso gli eidotipi realizzati è avvenuta una prima fase di conoscenza del manufatto e poi un’attenta riflessione sulle procedure da adottare.

È questo, infatti, lo stadio in cui sono stati valutati spazi e geometrie degli ambienti e matericità delle superfici. Si è scelto di produrre gli elaborati grafici a matita su carta acquarellabile, per avere un supporto più rigido e poter evidenziare le parti sezionate con un colore di riferimento.



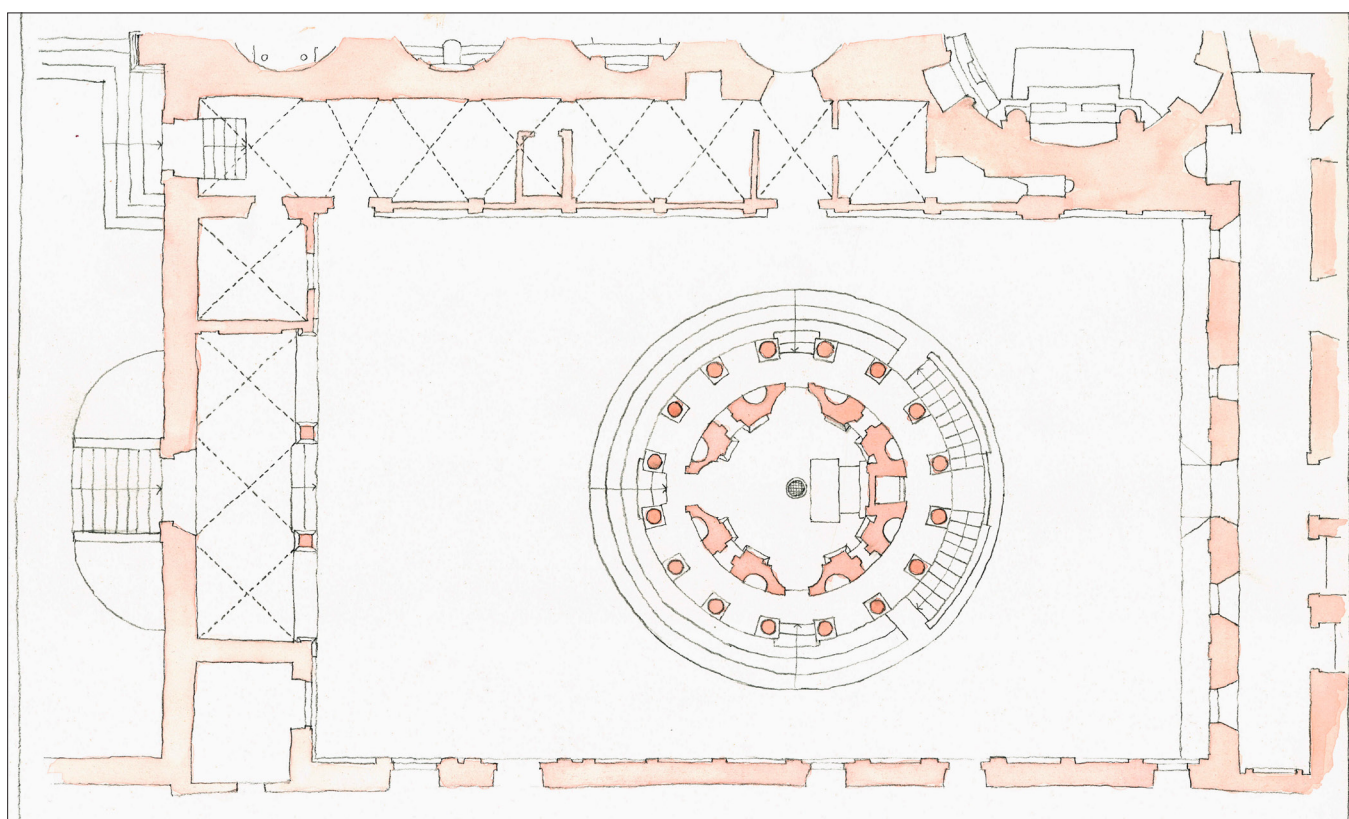


Fig. 62 – Eidotipo della pianta del chiostro del complesso di San Pietro in Montorio

Sulla base degli eidotipi si è:

- a) scelto il tipo di strumentazione da adottare
- b) progettato la battuta topografica (compresa l’individuazione dei punti in cui posizionare i chiodi topografici)
- c) scelto il posizionamento del laser scanner per la presa dei dati

#### *Strumentazione:*

Per le sue caratteristiche tecniche si è scelto di effettuare la battuta topografica con la stazione totale Leica TPS 1200<sup>2</sup>, che permette una comoda presa dei dati da parte di un unico rilevatore.

“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempio di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

La Leica TPS 1200 è, nel suo genere, lo strumento più avanzato che si trova attualmente in commercio.

Si avvale di un distanziometro senza prisma e di uno spot laser di piccolissime dimensioni (Laser dot taglia 2 cm/50 m) e permette misurazione di grande precisione (2 millimetri) e portata (misura distanze oltre i 1000 metri).

Per la scansione laser la scelta è invece ricaduta sulla nuova Scan-Station “all-in-one” Leica Geosystem, modello C10 (fig. 88).

Per le caratteristiche tecniche all’avanguardia, il laser scanner distanziometrico C10, viene definito un HDS (*High-Definition-Surveying*).

Lo strumento permette, infatti, di avere un ampio campo visivo (*field of view*, abbreviato in FOV) che va dai 360° in asse orizzontale, ai 270° in asse verticale.

La tecnologia Smart X-Mirror, nuovo specchio oscillante a rotazione verticale su supporto a rotazione orizzontale, permette delle riprese dei target molto più efficienti. A ciò si aggiunge un’elevata velocità di ripresa grazie al laser a tempo di volo capace di scansionare 50.000 punti al secondo, con la possibilità di arrivare ad un point-spacing di 1 mm x 1mm.

Queste caratteristiche tecniche permettono di realizzare una presa dati full-dome in soli due minuti.

La grande maneggevolezza del *controller on-board* (Fig.63) – display grafico digitale a colori (320x240 pixel) che permette una visione in tempo reale della messa in stazione – e la presenza del piombino laser e di una bolla torica esterna (nota 2/nota 14 2), consentono un rapido posizionamento dello strumento.



Fig. 63 – Controller on board della Scan Station C10.

Sempre grazie al *controller on-board*, è ora possibile selezionare le aree di scansione per una migliore definizione degli oggetti e dei target, e anche registrare la ripresa senza l’ausilio di un pc collegato.

Il C10 è inoltre dotato di due fotocamere, una è esterna e opzionale, la Canon EOS 60D con lente fish eye da 8mm F3,5ExDg, ad altissima risoluzione.

L’altra è interna – quella effettivamente adoperata per rilevare le immagini del Tempio – ha le seguenti caratteristiche: 17°x17°; 1920x1920 pixel; fino a 190 immagini auto-rettificanti per la ripresa full-dome; sensore integrato per l’auto-calibrazione della luce.

Il laser in dotazione al C10 appartiene alla classe 3R (IEC 60825-1) che corrisponde allo standard di sicurezza dei laser, definito in base alla lunghezza d’onda (verde con valore di 532 nm) e alla potenza, perché potenzialmente pericoloso per la vista.



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Infatti, il laser presente nel C10 è considerato sicuro solo avendo cura di evitare una diretta esposizione degli occhi ai suoi raggi. Rispetto agli apparecchi di precedente produzione, il C10 ha migliorato le prestazioni di misurazione diretta dei target, portandole a 2 mm, a 4 mm sulla distanza per ogni punto misurato, a 6 mm sulla posizione e a 12”/12” per gli angoli (fig. 90).



Fig. 64 – Scan Station C10 con apposito cavalletto.

Battuta topografica

La battuta topografica risulta essere supporto necessario all’elaborazione e all’orientamento spaziale delle nuvole di punti, nonché un ottimo strumento di controllo dei dati ottenuti in fase di ripresa <sup>3</sup>.

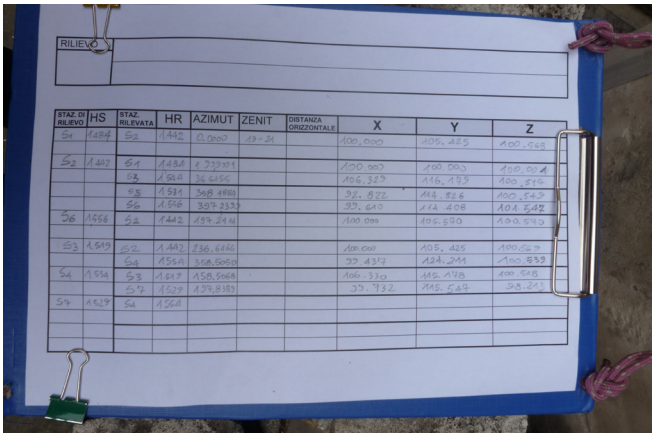


Fig. 65 – Libretto delle misure in fase di campagna topografica.



Fig. 65 –Target in poliplat, posizionato sulla superficie grazie al nastro telato

Nel nostro caso è stata effettuata per mezzo della stazione totale della Leica TPS 1200, con il supporto di chiodi topografici e di target BN (Fig.64).

La scelta dei target è ricaduta su quelli in bianco e nero su poliplat, anche se in commercio esistono vari modelli con caratteristiche molto diversificate, a seconda della capacità dello strumento di riconoscerli. Per la ripresa topografica si è proceduto posizionando i target e i chiodi topografici. In seguito, è stata rilevata la poligonale (nota 13).

#### *Posizionamento del laser scanner*

Per una comoda ed efficace presa dei dati, è stata progettata una poligonale chiusa romboidale con un braccio aperto in direzione dell’atrio del Tempietto, un altro in direzione della cella e un terzo in direzione della cripta (fig. 65).

Nelle riprese ravvicinate, si è scelto di stazionare la scan station C10 per ogni singolo intercolumnio, sempre in forma romboidale, da aggiungere alle due riprese mirate di dettaglio per la cella e la cripta.

Per realizzare le riprese della cupola del Tempietto, invece, si è deciso di sfruttare due affacci dai piani superiori della Real Accademia di Spagna.

Questa fase di progettazione preliminare è stata accompagnata da una campagna fotografica, finalizzata alla conoscenza e alla documentazione dello stato del monumento.



Fig. 66 – Fotografia dell’ingresso alla cripta del Tempeitto con il posizionamento del laser scanner.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

### 3.2.2 Seconda fase: acquisizione dati

Sappiamo che, durante la scansione, il raggio laser deve attraversare l’aria e riflettersi sul materiale prima di viaggiare nell’aria a ritroso fino allo strumento scansionatore. Per questo la pianificazione delle riprese sul campo deve tenere necessariamente conto delle condizioni climatiche. In caso, ad esempio, di neve, pioggia o nebbia non è consigliabile effettuare le riprese. Ma anche la luce solare, in caso di una diretta esposizione delle superfici da scansionare, può disturbare il raggio laser.

Esistono inoltre dei materiali che, per elevata riflettività (metallo smerigliato o pittura lucida), o elevata assorbanza (superfici nere o molto scure), rendono difficoltosa la scansione.

Per evitare che le condizioni ambientali influenzino il rilievo dei dati, andrebbero monitorate le condizioni climatiche in fase di programmazione del rilievo, optando per giornate in cui il cielo sia coperto e l’umidità relativa entro valori accettabili.

Anche le condizioni di temperatura devono essere il più possibile costanti, perché gli sbalzi termici possono creare condensa sulle ottiche e sullo specchio, circostanze che potrebbero far verificare degli errori di misura (figg. 93 e 93 bis).

Gli stessi produttori impongono che il rilievo avvenga all’interno di limiti di temperatura ambientale (da 0° a 40° C) e di umidità massima consentita (95%).

Fortunatamente, questi ultimi impedimenti non hanno inficiato l’acquisizione dati nel caso del Tempietto di San Pietro in Montorio.

L’acquisizione dei dati si è svolta in due sole giornate, dedicando la prima alle riprese generali in corrispondenza delle stazioni topografiche, completando con due riprese dall’alto per rilevare la cupola.

Il giorno successivo invece sono state eseguite le scansioni di dettaglio sui singoli intercolumni per rilevare le aree in cui si formavano i coni d’ombra e avere un’immagine completa del Tempietto (figg. 77 e 78).

In totale sono state eseguite ventiquattro scansioni con un passo variabile a seconda della definizione che si è voluta ottenere: per l’esterno è stato scelto un passo di 3x3 mm, mentre per l’interno, sia della cella che della cripta, si è scelto un passo di 2x2 mm.

Il *probe*, che corrisponde alla distanza ottimale di ripresa, è stato impostato per ogni singola scansione in funzione della distanza massima tra lo scanner e l’elemento architettonico.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

Rilievo BRAMANTP.GSI							
N. Stazioni 11							
Stazione S1							
H. Strum. 1.4840							
N. Misure 64							
Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S2	1.4420	399.9990	93.8437	5.4500	5.4245	0.5682	
19	0.0000	106.5584	100.1128	4.3200	4.3200	1.4763	
20	0.0000	305.4367	98.5436	4.3350	4.3339	1.5832	
21	0.0000	244.8314	105.9804	1.7860	1.7781	1.3165	
P1	0.0000	164.5925	103.8963	2.3360	2.3316	1.3411	
P2	0.0000	149.4594	101.7008	1.9230	1.9223	1.4326	
P3	0.0000	118.8836	100.0983	4.4900	4.4900	1.4771	
P4	0.0000	78.4393	97.9449	4.6010	4.5986	1.6325	
P5	0.0000	77.7222	98.2320	4.5770	4.5752	1.6111	
P6	0.0000	74.0384	97.6320	4.6790	4.6758	1.6580	
P7	0.0000	79.0193	106.6474	4.2410	4.2179	1.0420	
P8	0.0000	45.8526	119.8137	1.8750	1.7849	0.9098	
P9	0.0000	53.2428	101.5747	2.1260	2.1253	1.4314	
P10	0.0000	49.8231	101.5763	2.0080	2.0074	1.4343	
P11	0.0000	44.4930	99.2287	2.0150	2.0149	1.5084	
P12	0.0000	38.9208	99.2293	2.2290	2.2288	1.5110	
P13	0.0000	34.2272	120.6289	2.3580	2.2353	0.7332	
P14	0.0000	362.9962	117.0052	2.3520	2.2686	0.8632	
P15	0.0000	359.0949	102.8726	2.2530	2.2507	1.3824	
P16	0.0000	354.0089	96.0117	2.0330	2.0290	1.6113	
P17	0.0000	348.7163	96.3000	2.0230	2.0196	1.6015	
P18	0.0000	345.2598	100.7515	2.1370	2.1369	1.4588	
P19	0.0000	351.7564	131.5457	2.0540	1.8069	0.5073	
P20	0.0000	320.2666	99.7799	4.6310	4.6310	1.5000	
P21	0.0000	320.7762	99.2806	4.6160	4.6157	1.5362	
P22	0.0000	324.3781	99.2812	4.7160	4.7157	1.5373	
P23	0.0000	317.9917	109.6908	4.6300	4.5765	0.7819	
P24	0.0000	312.0508	107.3962	4.4560	4.4260	0.9675	
P25	0.0000	287.4899	107.5852	4.3870	4.3559	0.9625	
P26	0.0000	280.3686	107.0566	4.5750	4.5469	0.9779	
P27	0.0000	241.9548	108.0418	1.7280	1.7142	1.2663	
P28	0.0000	223.9924	107.0581	2.1670	2.1537	1.2442	
P29	0.0000	221.5980	108.8824	2.1480	2.1271	1.1853	
P30	0.0000	166.7057	133.3122	2.6290	2.2772	0.1703	
PS31	0.0000	79.9611	75.2899	4.9300	4.5633	3.3499	
PS32	0.0000	88.2943	62.9819	5.2620	4.3972	4.3742	
PS33	0.0000	103.4631	59.9587	5.3180	4.3003	4.6126	
PS34	0.0000	115.5697	66.4610	5.1150	4.4214	4.0558	
PS35	0.0000	119.4498	74.8219	4.8790	4.5024	3.3637	
PS36	0.0000	279.8733	75.3762	4.9260	4.5621	3.3422	
PS37	0.0000	287.6482	63.4922	5.2990	4.4513	4.3589	
PS38	0.0000	302.1855	60.3890	5.3820	4.3734	4.6208	
PS39	0.0000	310.8659	63.5544	5.2880	4.4449	4.3486	
PS40	0.0000	318.3007	74.8817	4.9540	4.5734	3.3883	
PS41	0.0000	320.1243	79.6973	4.8580	4.6130	3.0072	
PS42	0.0000	255.8124	57.9651	2.7750	2.1917	3.1860	
PS43	0.0000	247.9522	53.9916	2.5510	1.9133	3.1713	
PS44	0.0000	241.5703	40.2190	2.9840	1.7622	3.8921	
PS45	0.0000	238.1826	38.0663	3.0410	1.7119	3.9974	
PS46	0.0000	223.4554	31.4918	3.1470	1.4940	4.2538	
PS47	0.0000	200.5384	28.3372	3.1860	1.3718	4.3596	
PS48	0.0000	155.4323	38.3406	3.0930	1.7522	4.0328	
PS49	0.0000	149.0286	51.0801	2.7240	1.9586	3.3772	

Fig. 67 – Libretto delle misure restituito dalla macchina.



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
PS50	0.0000	149.3673	54.2363	2.5880	1.9476	3.1883	
PS51	0.0000	141.1550	58.7324	2.8300	2.2559	3.1927	
PS52	0.0000	148.1467	21.7131	3.0830	1.0312	4.3894	
PS53	0.0000	148.1449	10.4578	3.1060	0.5079	4.5482	
PS54	0.0000	348.4244	19.6307	3.0780	0.9342	4.4168	
PS55	0.0000	348.9971	41.5677	2.8820	1.7509	3.7732	
PS56	0.0000	399.1706	27.9429	3.2210	1.3688	4.3997	
PS57	0.0000	399.1706	27.9429	3.2210	1.3688	4.3997	
PS58	0.0000	399.1702	27.4204	3.2770	1.3682	4.4617	
PS59	0.0000	71.4998	53.8187	4.3320	3.2413	4.3580	
PS60	0.0000	326.9014	53.8056	4.4010	3.2923	4.4045	

### Stazione S2

H. Strum. 1.4420

N. Misure 8

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S1	1.4840	199.9990	106.1424	5.4500	5.4247	-0.5670	
22	0.0000	88.6741	110.5122	7.6980	7.5933	0.1766	
23	0.0000	136.4581	99.0534	6.6830	6.6823	1.5414	
24	0.0000	265.1620	98.6702	7.1530	7.1514	1.5914	
25	0.0000	321.7091	102.6429	8.4600	8.4527	1.0909	
S3	1.5440	36.6455	99.7257	11.6280	11.6279	-0.0519	
S5	1.5310	358.4893	99.6262	11.8290	11.8288	-0.0196	
S6	1.5560	397.2408	92.3014	9.0580	8.9918	0.9787	

### Stazione S6

H. Strum. 1.5560

N. Misure 6

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S2	1.4420	197.2408	107.6850	9.0580	8.9921	-0.9768	
27	0.0000	311.5094	87.9850	2.6860	2.6383	2.0599	
29	0.0000	360.6342	119.9255	2.7330	2.6002	0.7145	
31	0.0000	54.4047	126.8729	2.8560	2.6053	0.3859	
28	0.0000	133.4148	114.6596	2.1110	2.0553	1.0742	
30	0.0000	260.2199	116.9796	1.8960	1.8290	1.0563	

### Stazione S3

H. Strum. 1.5190

N. Misure 2

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S2	1.4420	236.6455	100.3133	11.6280	11.6280	0.0530	
S4	1.5540	358.5064	99.6753	11.3620	11.3619	0.0230	

### Stazione S4

H. Strum. 1.5540

N. Misure 8

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S3	1.5190	158.5064	100.3133	11.3620	11.3619	-0.0209	
26	0.0000	151.8840	102.4115	11.5670	11.5587	1.1159	

Fig. 68 – Libretto delle misure della poligonale restituito dalla macchina.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
35	0.0000	93.0701	103.3741	7.8140	7.8030	1.1400	
34	0.0000	378.4666	102.5473	2.1630	2.1613	1.4675	
36	0.0000	292.8974	99.1866	7.7220	7.7214	1.6527	
32	0.0000	243.2001	99.8377	12.3600	12.3600	1.5855	
33	0.0000	232.8265	108.8602	5.5130	5.4597	0.7892	
S7	1.5290	197.8390	116.8646	8.9820	8.6687	-2.3267	

<b>Stazione S7</b> <b>H. Strum. 1.5290</b> <b>N. Misure 6</b>							
Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S4	1.5540	397.8390	83.1241	8.9820	8.6683	2.3282	
41	0.0000	39.7655	107.1297	1.8400	1.8285	1.3234	
37	0.0000	212.6272	123.4849	2.2320	2.0818	0.7242	
39	0.0000	263.2235	104.9447	2.6010	2.5932	1.3272	
38	0.0000	324.7315	136.7971	2.3420	1.9615	0.2494	
40	0.0000	136.7152	133.3413	2.8980	2.5096	0.0797	

<b>Stazione S4</b> <b>H. Strum. 1.4860</b> <b>N. Misure 2</b>							
Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S3	1.4950	158.5064	100.0668	11.3650	11.3650	-0.0209	
S5	1.4920	239.0747	99.9169	11.4860	11.4860	0.0090	

<b>Stazione S5</b> <b>H. Strum. 1.4920</b> <b>N. Misure 2</b>							
Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S4	1.4860	39.0828	100.0740	11.4860	11.4860	-0.0074	
S2	1.5450	158.4911	99.6005	11.8320	11.8318	0.0213	

<b>Stazione S2</b> <b>H. Strum. 1.5080</b> <b>N. Misure 4</b>							
Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S1	1.5380	199.9990	106.2685	5.4540	5.4276	-0.5662	
85	0.0000	171.0825	106.5829	7.5560	7.5156	0.7281	
79	0.0000	175.2602	92.1981	3.9390	3.9095	1.9895	
91	0.0000	358.8153	99.3780	13.2320	13.2314	1.6373	

<b>Stazione S2</b> <b>H. Strum. 1.5010</b> <b>N. Misure 4</b>							
Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione

Fig. 69 – Libretto delle misure della poligonale restituito dalla macchina.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S3	1.5500	36.6455	100.0096	11.6300	11.6300	-0.0508	
31B	0.0000	364.5028	102.1556	15.2420	15.2333	0.9850	
45B	0.0000	390.6025	104.6109	5.4970	5.4826	1.1032	
46B	0.0000	19.2678	109.9806	6.1370	6.0617	0.5428	

### Stazione S3

H. Strum. 1.5500

N. Misure 4

Codice	H. Prism	Azimut	Zenith	D. incl.	D. rid.	Disliv.	Descrizione
S2	1.5010	236.6455	99.9810	11.6300	11.6300	0.0525	
92	0.0000	15.9110	111.3616	3.4470	3.3923	0.9381	
93	0.0000	0.9150	101.8874	11.2490	11.2441	1.2166	
39B	0.0000	392.7559	106.0124	11.1680	11.1182	0.4968	

Fig. 70 – Libretto delle misure della poligonale restituito dalla macchina.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

Codice	Est	Nord	Quota	Err. E	Err. N	Err. Q	Descrizione
S1	100.0000	100.0000	99.9998				
S2	100.0000	105.4250	100.5680	0.0000	0.0000	0.0000	
19	104.2971	99.5557	101.4761	0.0000	0.0000	0.0000	
20	95.6819	100.3697	101.5830	0.0000	0.0000	0.0000	
21	98.8488	98.6449	101.3163	0.0000	0.0000	0.0000	
P1	101.2309	98.0198	101.3409	0.0000	0.0000	0.0000	
P2	101.3708	98.6523	101.4324	0.0000	0.0000	0.0000	
P3	104.2939	98.6875	101.4769	0.0000	0.0000	0.0000	
P4	104.3374	101.5278	101.6323	0.0000	0.0000	0.0000	
P5	104.2980	101.5685	101.6109	0.0000	0.0000	0.0000	
P6	104.2924	101.8543	101.6578	0.0000	0.0000	0.0000	
P7	103.9909	101.3650	101.0418	0.0000	0.0000	0.0000	
P8	101.1773	101.3416	100.9096	0.0000	0.0000	0.0000	
P9	101.5774	101.4244	101.4312	0.0000	0.0000	0.0000	
P10	101.4155	101.4234	101.4341	0.0000	0.0000	0.0000	
P11	101.2963	101.5425	101.5082	0.0000	0.0000	0.0000	
P12	101.2794	101.8251	101.5108	0.0000	0.0000	0.0000	
P13	101.1447	101.9199	100.7330	0.0000	0.0000	0.0000	
P14	98.7544	101.8960	100.8630	0.0000	0.0000	0.0000	
P15	98.6513	101.8019	101.3822	0.0000	0.0000	0.0000	
P16	98.6584	101.5222	101.6111	0.0000	0.0000	0.0000	
P17	98.5435	101.3990	101.6013	0.0000	0.0000	0.0000	
P18	98.3808	101.3944	101.4586	0.0000	0.0000	0.0000	
P19	98.7580	101.3125	100.5071	0.0000	0.0000	0.0000	
P20	95.6017	101.4496	101.4998	0.0000	0.0000	0.0000	
P21	95.6279	101.4798	101.5360	0.0000	0.0000	0.0000	
P22	95.6259	101.7620	101.5370	0.0000	0.0000	0.0000	
P23	95.6051	101.2763	100.7817	0.0000	0.0000	0.0000	
P24	95.6531	100.8329	100.9673	0.0000	0.0000	0.0000	
P25	95.7279	99.1496	100.9623	0.0000	0.0000	0.0000	
P26	95.6675	98.6201	100.9777	0.0000	0.0000	0.0000	
P27	98.9503	98.6448	101.2661	0.0000	0.0000	0.0000	
P28	99.2074	97.9975	101.2440	0.0000	0.0000	0.0000	
P29	99.2921	97.9941	101.1851	0.0000	0.0000	0.0000	
P30	101.1374	98.0272	100.1700	0.0000	0.0000	0.0000	
PS31	104.3391	101.4127	103.3497	0.0000	0.0000	0.0000	
PS32	104.3231	100.8039	104.3740	0.0000	0.0000	0.0000	
PS33	104.2940	99.7661	104.6124	0.0000	0.0000	0.0000	
PS34	104.2898	98.9293	104.0556	0.0000	0.0000	0.0000	
PS35	104.2938	98.6457	103.3635	0.0000	0.0000	0.0000	
PS36	95.6640	98.5817	103.3420	0.0000	0.0000	0.0000	
PS37	95.6322	99.1418	104.3587	0.0000	0.0000	0.0000	
PS38	95.6292	100.1502	104.6206	0.0000	0.0000	0.0000	
PS39	95.6197	100.7550	104.3484	0.0000	0.0000	0.0000	
PS40	95.6143	101.2967	103.3881	0.0000	0.0000	0.0000	
PS41	95.6156	101.4341	103.0069	0.0000	0.0000	0.0000	
PS42	98.3153	98.5980	103.1858	0.0000	0.0000	0.0000	
PS43	98.6913	98.6043	103.1710	0.0000	0.0000	0.0000	
PS44	98.9293	98.6003	103.8918	0.0000	0.0000	0.0000	
PS45	99.0337	98.5869	103.9972	0.0000	0.0000	0.0000	
PS46	99.4619	98.6063	104.2535	0.0000	0.0000	0.0000	
PS47	99.9884	98.6283	104.3593	0.0000	0.0000	0.0000	
PS48	101.1289	98.6599	104.0326	0.0000	0.0000	0.0000	
PS49	101.4059	98.6364	103.3770	0.0000	0.0000	0.0000	
PS50	101.3908	98.6366	103.1880	0.0000	0.0000	0.0000	
PS51	101.8007	98.6411	103.1925	0.0000	0.0000	0.0000	
PS52	100.7501	99.2923	104.3892	0.0000	0.0000	0.0000	
PS53	100.3695	99.6514	104.5480	0.0000	0.0000	0.0000	
PS54	99.3233	100.6440	104.4166	0.0000	0.0000	0.0000	
PS55	98.7426	101.2184	103.7730	0.0000	0.0000	0.0000	
PS56	99.9822	101.3687	104.3995	0.0000	0.0000	0.0000	
PS57	99.9822	101.3687	104.3995	0.0000	0.0000	0.0000	
PS58	99.9822	101.3681	104.4615	0.0000	0.0000	0.0000	
PS59	102.9219	101.4030	104.3578	0.0000	0.0000	0.0000	
PS60	96.9973	101.3502	104.4043	0.0000	0.0000	0.0000	

Fig. 71 – Libretto delle misure restituito dalla macchina.



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Codice	Est	Nord	Quota	Err. E	Err. N	Err. Q	Descrizione
22	107.4734	106.7689	100.7446	0.0000	0.0000	0.0000	
23	105.6162	101.8041	102.1094	0.0000	0.0000	0.0000	
24	93.8930	101.7038	102.1594	0.0000	0.0000	0.0000	
25	92.0340	108.2517	101.6589	0.0000	0.0000	0.0000	
S3	106.3301	115.1799	100.5165	0.0002	0.0009	0.0010	
S5	92.8212	114.8272	100.5472	-0.0001	0.0035	0.0015	
S6	99.6103	114.4084	101.5467	0.0000	0.0000	0.0000	
27	97.0149	114.8827	103.6066	0.0000	0.0000	0.0000	
29	98.1029	116.5271	102.2612	0.0000	0.0000	0.0000	
31	101.5754	116.1189	101.9326	0.0000	0.0000	0.0000	
28	101.3889	113.3785	102.6209	0.0000	0.0000	0.0000	
30	98.1269	113.3385	102.6030	0.0000	0.0000	0.0000	
S4	99.4375	124.2152	100.5389	0.0005	0.0021	0.0014	
26	107.3644	115.8029	101.6548	0.0000	0.0000	0.0000	
35	107.1944	125.0621	101.6789	0.0000	0.0000	0.0000	
34	98.7205	126.2541	102.0064	0.0000	0.0000	0.0000	
36	91.7640	123.3563	102.1915	0.0000	0.0000	0.0000	
32	91.6782	114.5943	102.1244	0.0000	0.0000	0.0000	
33	96.7449	119.4657	101.3281	0.0000	0.0000	0.0000	
S7	99.7308	115.5515	98.2122	0.0000	0.0000	0.0000	
41	100.8002	117.0346	99.5356	0.0000	0.0000	0.0000	
37	99.3204	113.5105	98.9364	0.0000	0.0000	0.0000	
39	97.5583	114.1356	99.5394	0.0000	0.0000	0.0000	
38	97.9155	116.2947	98.4617	0.0000	0.0000	0.0000	
40	101.8343	114.1829	98.2919	0.0000	0.0000	0.0000	
85	103.2976	98.6714	101.2961	0.0000	0.0000	0.0000	
79	101.4813	101.8070	102.5575	0.0000	0.0000	0.0000	
91	92.0251	115.9830	102.2053	0.0000	0.0000	0.0000	
31B	91.9392	118.3508	101.5530	0.0000	0.0000	0.0000	
45B	99.1935	110.8480	101.6712	0.0000	0.0000	0.0000	
46B	101.8067	111.2112	101.1108	0.0000	0.0000	0.0000	
92	107.1691	118.4668	101.4546	0.0000	0.0000	0.0000	
93	106.4915	126.4228	101.7331	0.0000	0.0000	0.0000	
39B	105.0675	126.2262	101.0134	0.0000	0.0000	0.0000	

Fig. 72 – Libretto delle misure restituito dalla macchina.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

Data: mercoledì 18 aprile 2012							
Leonardo Software House Srl http://www.leosh.com							
Calcolo della poligonale: S2, S3, S4, S5, S2							
Poligonale Chiusa E' stata eseguita una compensazione planoaltimetrica. Lunghezza della poligonale: 46.3076 m Errore di chiusura angolare: -0.0062 ( Tolleranza: 0.0224 ) Errore di chiusura lineare: 0.0039 ( Tolleranza: 0.0803 ) Errore di chiusura sulle coordinate: Est: 0.0002 Nord: -0.0039 Errore medio di andata/ritorno: 0.0006							
Elenco stazioni utilizzate							
Codice	Est	Nord	Quota	Err. Est	Err. Nord	Err. Quota	Errore
S2	100.0000	105.4250	100.5680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S3	106.3301	115.1799	100.5165	0.0002	0.0009	0.0010	0.0013
S4	99.4375	124.2152	100.5389	0.0005	0.0021	0.0014	0.0026
S5	92.8212	114.8272	100.5472	-0.0001	0.0035	0.0015	0.0038
S2	100.0000	105.4250	100.5680	-0.0009	0.0039	0.0019	0.0045
Dettagli del calcolo							
	Letture precedenti		Stazione S2	Letture successive S3			
Misure	Angolo:		Angolo compreso:	Angolo:	36.6465		
	Distanza:			Distanza:	11.6279		
	Dislivello:			Dislivello:	-0.0524		
Calcolo	Angolo:	σ 0.0000	Angolo compreso:	Angolo:	36.6478	σ 0.0012	
	Distanza:	σ	Scarto:	Distanza:	11.6288	σ 0.0008	
	Dislivello:	σ		Dislivello:	-0.0515	σ 0.0010	

Fig. 73 – Compensazione della poligonale eseguita con il software Leonardo.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

	Lettura precedente S2	Stazione S3	Lettura successiva S4
Misure	Angolo: -163.3535 Distanza: 11.6279 Dislivello: 0.0524	Angolo compreso: 121.8609	Angolo: 358.5074 Distanza: 11.3634 Dislivello: 0.0219
Calcolate	Angolo: -163.3522 $\sigma$ 0.0000 Distanza: 11.6279 $\sigma$ 0.0000 Dislivello: 0.0524 $\sigma$ 0.0000	Angolo compreso: 121.8622 Scarto: 0.0012	Angolo: 358.5099 $\sigma$ 0.0025 Distanza: 11.3642 $\sigma$ 0.0008 Dislivello: 0.0223 $\sigma$ 0.0004
	Lettura precedente S3	Stazione S4	Lettura successiva S5
Misure	Angolo: 158.5074 Distanza: 11.3634 Dislivello: -0.0219	Angolo compreso: 80.5683	Angolo: 239.0757 Distanza: 11.4860 Dislivello: 0.0082
Calcolate	Angolo: 158.5099 $\sigma$ 0.0000 Distanza: 11.3634 $\sigma$ 0.0000 Dislivello: -0.0219 $\sigma$ 0.0000	Angolo compreso: 80.5695 Scarto: 0.0012	Angolo: 239.0795 $\sigma$ 0.0037 Distanza: 11.4852 $\sigma$ -0.0008 Dislivello: 0.0083 $\sigma$ 0.0002
	Lettura precedente S4	Stazione S5	Lettura successiva S2
Misure	Angolo: 39.0757 Distanza: 11.4860 Dislivello: -0.0082	Angolo compreso: 119.4084	Angolo: 158.4841 Distanza: 11.8303 Dislivello: 0.0204
Calcolate	Angolo: 39.0795 $\sigma$ 0.0001 Distanza: 11.4860 $\sigma$ 0.0000 Dislivello: -0.0082 $\sigma$ 0.0000	Angolo compreso: 119.4096 Scarto: 0.0012	Angolo: 158.4891 $\sigma$ 0.0050 Distanza: 11.8295 $\sigma$ -0.0008 Dislivello: 0.0208 $\sigma$ 0.0004
	Lettura precedente S5	Stazione S2	Lettura successiva
Misure	Angolo: -41.5159 Distanza: 11.8303 Dislivello: -0.0204	Angolo compreso:	Angolo: Distanza: Dislivello:
Calcolate	Angolo: -41.5109 $\sigma$ 0.0001 Distanza: 11.8303 $\sigma$ 0.0000 Dislivello: -0.0204 $\sigma$ 0.0000	Angolo compreso: Scarto:	Angolo: $\sigma$ 0.0000 Distanza: $\sigma$ Dislivello: $\sigma$

Fig. 74 – Compensazione della poligonale eseguita con il software Leonardo-.

“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempio di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

Operazioni topografiche

Calcolo della poligonale : S2, S3, S4, S5, S2

Chiusa  
E' stata eseguita una compensazione planoaltimetrica.  
Lunghezza della poligonale: 46.3076  
Errore di chiusura angolare: -0.0062 (Tolleranza: 0.0224)  
Errore di chiusura lineare: 0.0039 (Tolleranza: 0.0803)  
Errore di chiusura sulle coordinate:  
Est: 0.0002 Nord: -0.0039 Quota: -0.0019  
Errore medio di andata/ritorno:  
Distanze: 0.0006 Dislivelli: 0.0006

Elenco stazioni utilizzate							
Codice	Est	Nord	Quota	E.Est	E.Nord	E.Quota	Errore
S2	100.0000	105.4250	100.5680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S3	106.3301	115.1799	100.5165	0.0002	0.0009	0.0010	0.0013
S4	99.4375	124.2152	100.5389	0.0005	0.0021	0.0014	0.0026
S5	92.8212	114.8272	100.5472	-0.0001	0.0035	0.0015	0.0038
S2	100.0000	105.4250	100.5680	-0.0009	0.0039	0.0019	0.0045

Correzioni angolari sul rilievo BRAMANTP.GSI

Stazione S1		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	0.0010	0.0000
S2	0.0010	0.0000
Stazione S2		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	-0.0011	0.0018
S1	0.0010	0.0000
S3	-0.0010	0.0000
S5	-0.0033	0.0000
Stazione S6		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	399.9989	0.0000
S2	399.9989	0.0000
Stazione S3		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	0.0028	0.0038
S2	399.9990	0.0000
S4	0.0065	0.0000
Stazione S4		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	0.0065	0.0000
S3	0.0065	0.0000
Stazione S7		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	0.0065	0.0000
S4	0.0065	0.0000
Stazione S4		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	0.0073	0.0008
S3	0.0065	0.0000
S5	0.0081	0.0000
Stazione S5		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	-0.0025	0.0026
S4	0.0000	0.0000
S2	-0.0051	0.0000
Stazione S2		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	0.0010	0.0000
S1	0.0010	0.0000
Stazione S2		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	399.9990	0.0000
S3	399.9990	0.0000
Stazione S3		
Orientamento	Correzione	Err./scarto
Correzione media	399.9990	0.0000
S2	399.9990	0.0000

Fig. 75 – Compensazione della angolari della poligonale eseguita con il software Leonardo-.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

Generali:

Nome	Maglia	Data	Temperatura	Umidità	Tipo di ripresa	Probe
St2 Tempietto	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target <u>all</u>	10 m
St3 Tempietto	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target <u>all</u>	10 m
St4 Tempietto	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target <u>all</u>	10 m
St5 Tempietto	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target <u>all</u>	10 m
Cripta	2x2	02/04/12	18°-20°	-	Target <u>all</u>	4 m
Interno Tempietto	2x2	02/04/12	18°-20°	-	Target <u>all</u>	6 m
Tempietto Cupola	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target <u>all</u>	16 m
Tempietto Cupola 2	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target <u>all</u>	16 m
Tempietto Ingresso	3x3	04/04/12	17°-19°	80-60%	Target <u>all</u>	6 m

Fig. 77 – Elenco delle singole scansioni effettuate con descrizione delle condizioni climatiche, della maglia e del tipo di ripresa.

“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Dettaglio:

Nome	Maglia	Data	Temperatura	Umidità	Tipo di ripresa	Probe
Tempio di San Pietro in Montorio	3x3	04/04/12	17°-19°	80-60%	Target all	4 m
Cripta 2	2x2	02/04/12	18°-20°	-	Target all	4 m
Fornice 1	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target all	4 m
Fornice 2	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target all	4 m
Fornice 3	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target all	4 m
Fornice 4	3x3	02/04/12	18°-20°	62-52%	Target all	4 m
Fornice 5	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target all	4 m
Fornice 6	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target all	4 m
Fornice 7	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target all	4 m
Fornice 8	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target all	4 m
Fornice 9	3x3	03/04/12	19°-21°	56-45%	Target all	4 m
Fornice 10	3x3	04/04/12	17°-19°	80-60%	Target all	4 m
Fornice 11	3x3	04/04/12	17°-19°	80-60%	Target all	4 m
Fornice 12	3x3	04/04/12	17°-19°	80-60%	Target all	4 m
Fornice 13	3x3	04/04/12	17°-19°	80-60%	Target all	4 m

Fig. 78 – Elenco delle singole scansioni effettuate con descrizione delle condizioni climatiche, della maglia e del tipo di ripresa.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

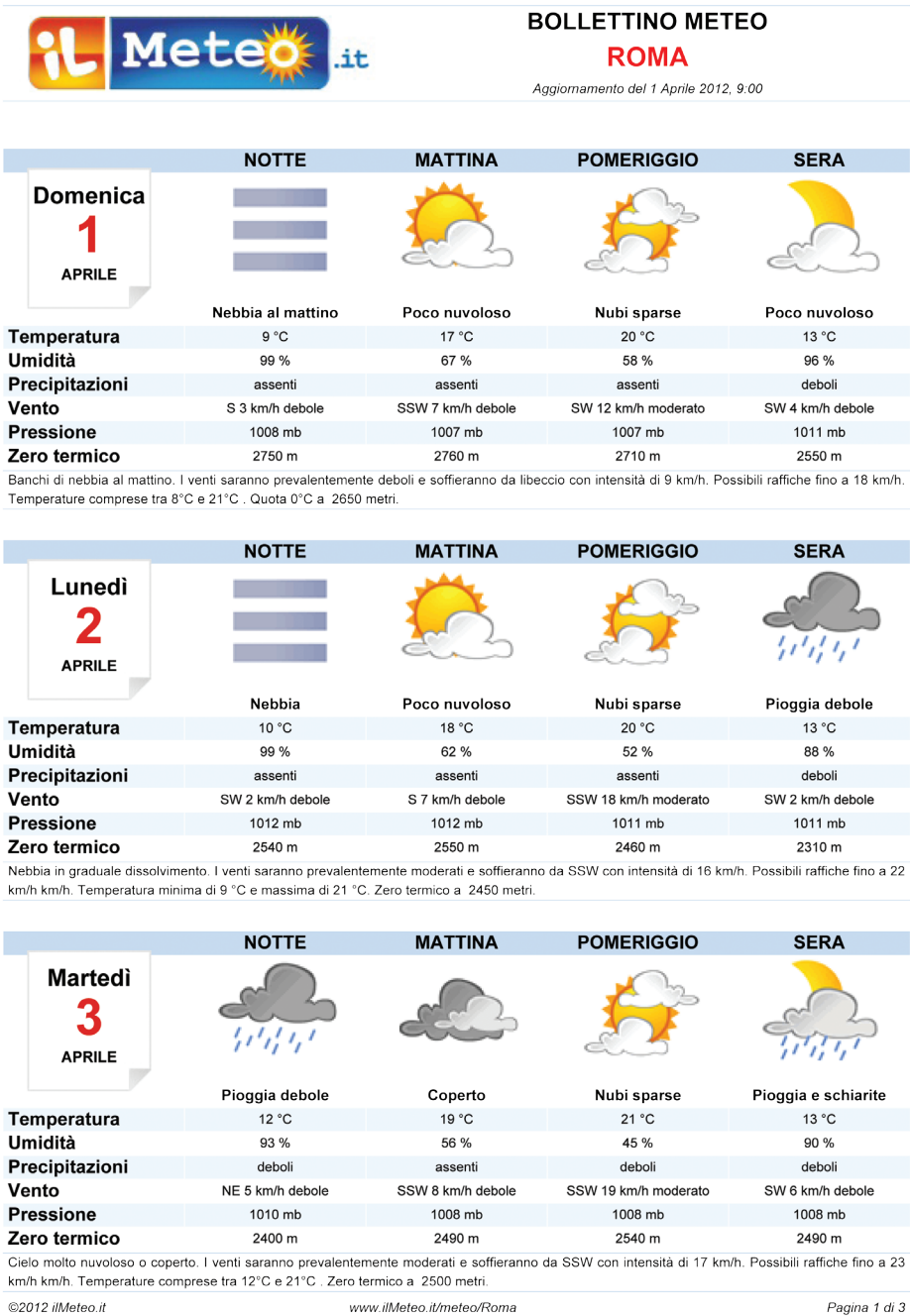


Fig. 79 – Controllo delle condizioni climatiche nei giorni di ripresa.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

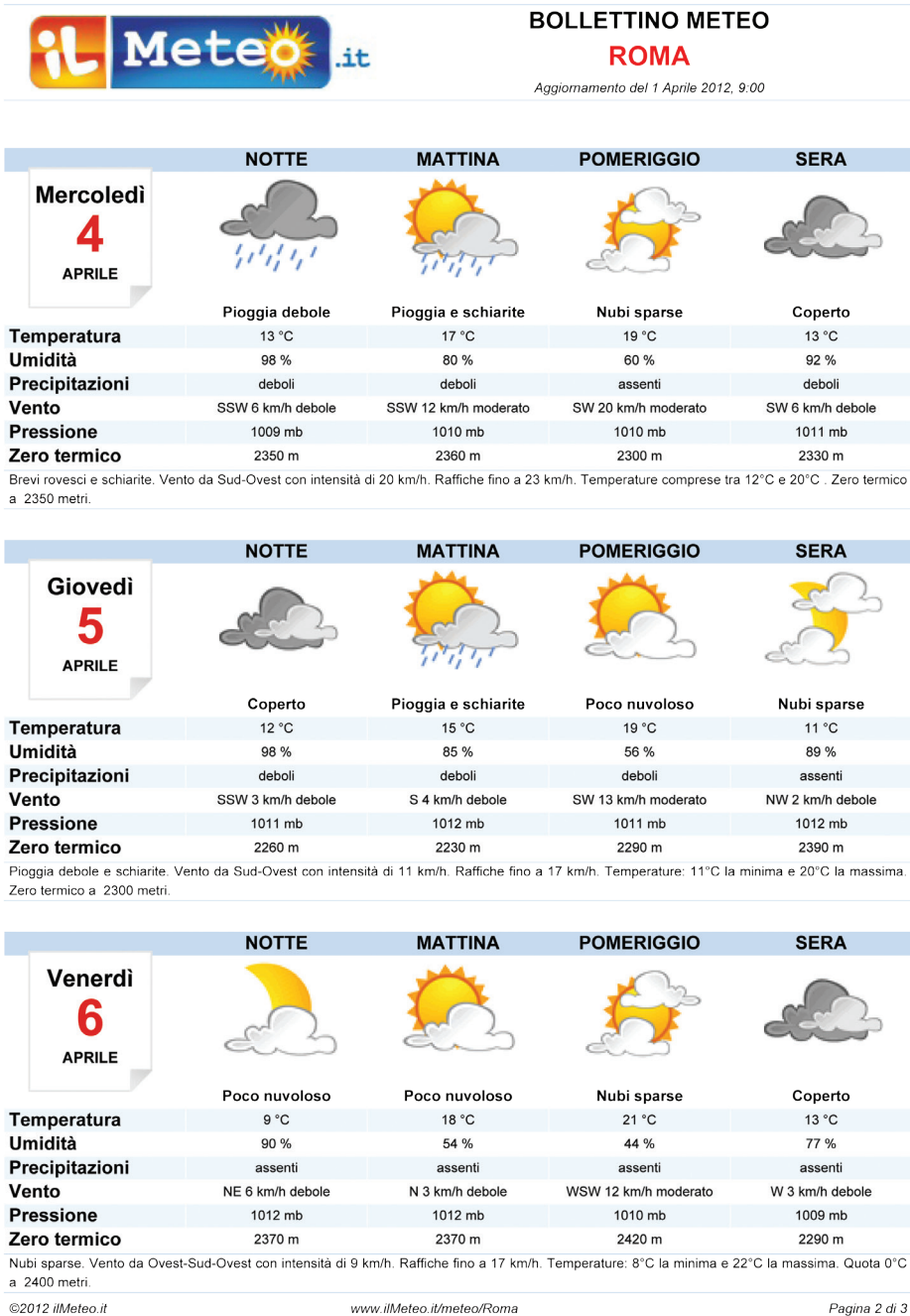


Fig. 80 – Elenco delle singole scansioni effettuate con descrizione delle condizioni climatiche, della maglia e del tipo di ripresa.



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempio di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

#### 3.2.3 Terza fase: trasformazione del modello numerico in un modello geometrico

Una volta acquisiti i dati<sup>4</sup>, si passa a elaborarli sintetizzando il lavoro di tipo topografico con la scansione laser, attraverso il metodo della geo-referenziazione.

Con l’ausilio del software Cyclone, si rintracciano le corrispondenze fra i punti scansionati dal laser e i punti topografici. In sostanza, il software sovrappone i punti tracciati con i due diversi sistemi di misurazione e riconosce i punti omologhi.

Per ottenere tale risultato, Cyclone esegue una roto-traslazione in sei parametri (tre rotazioni e tre traslazioni) per ogni nuvola di punti rilevata durante la scansione laser, comparandola col sistema di punti topografico.

In questa fase avviene anche il controllo degli errori, che consente di verificare e migliorare la concordanza tra i punti topografici e quelli della nuvola.



Fig.81– Screen shot della nuvola di punti in colori rgb



Fig.82– Screen shot della nuvola di punti in toni di grigio



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

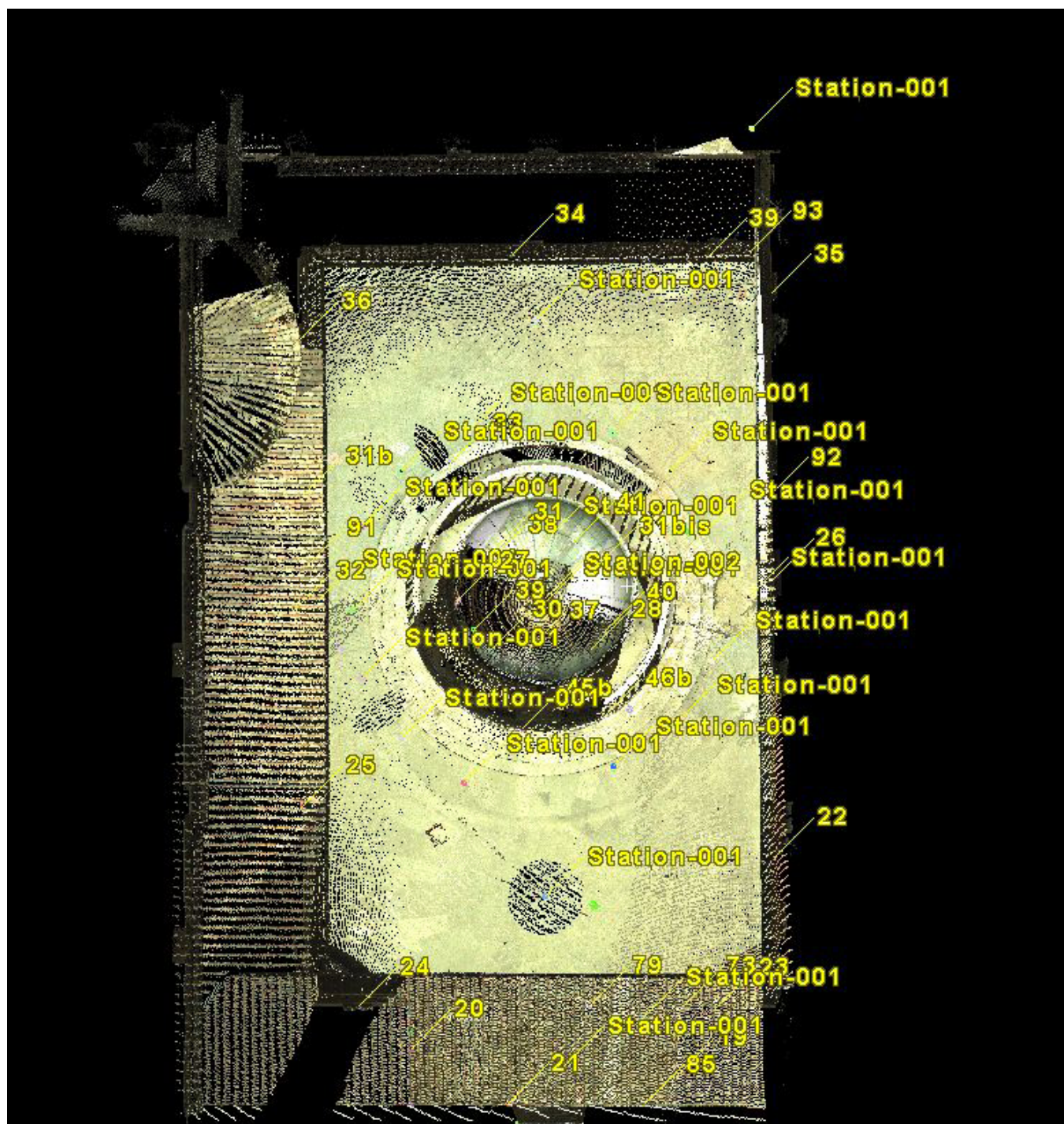


Fig. 83 – Visualizzazione della nuvola di punti orientata con l’elenco delle scansioni e dei punti di controllo.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

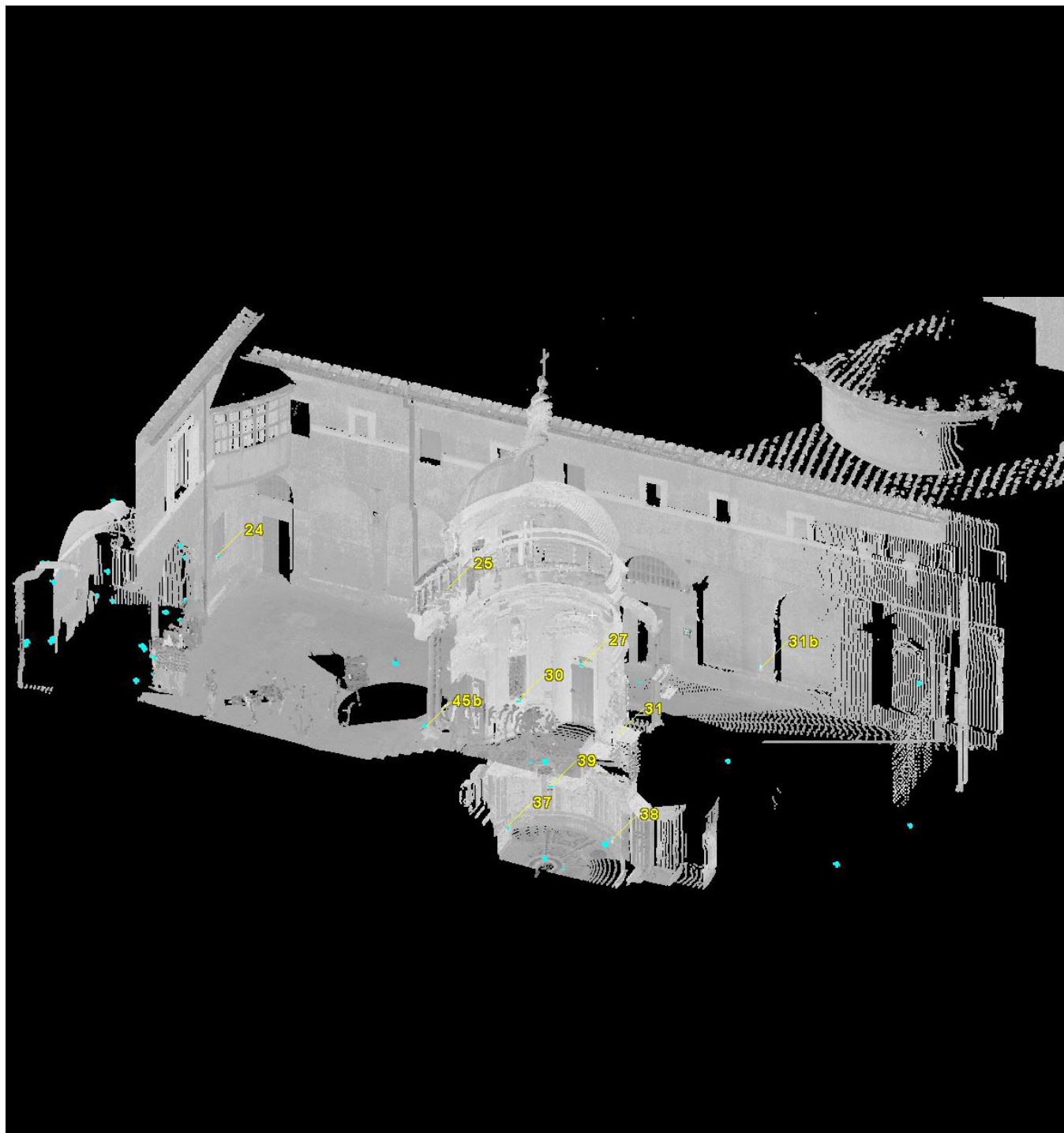
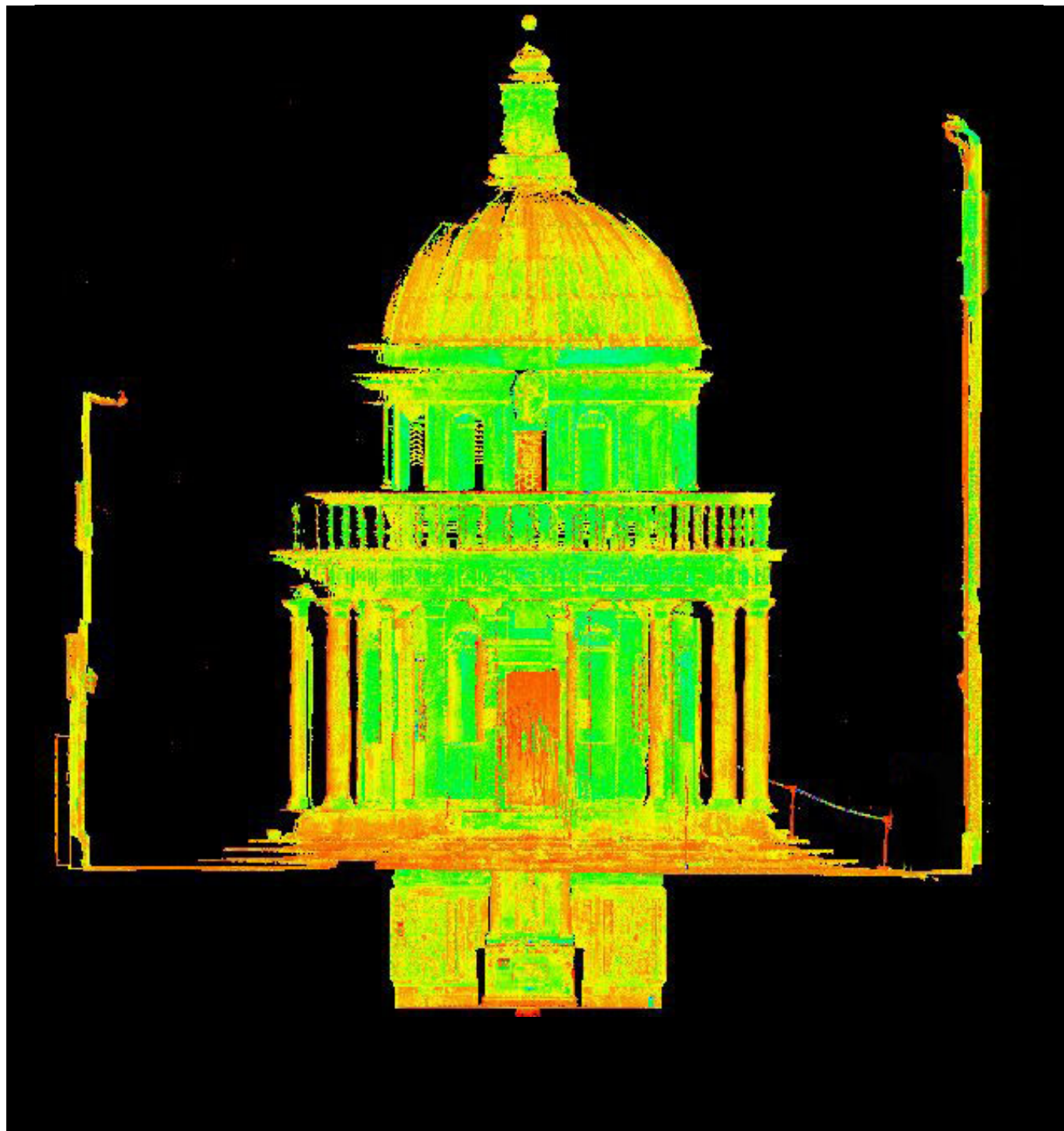


Fig. 84 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità toni di grigio, sezione assonometrica con i punti di controllo, del Tempietto.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 85 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità riflettanza della prospettiva del Tempietto.*





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

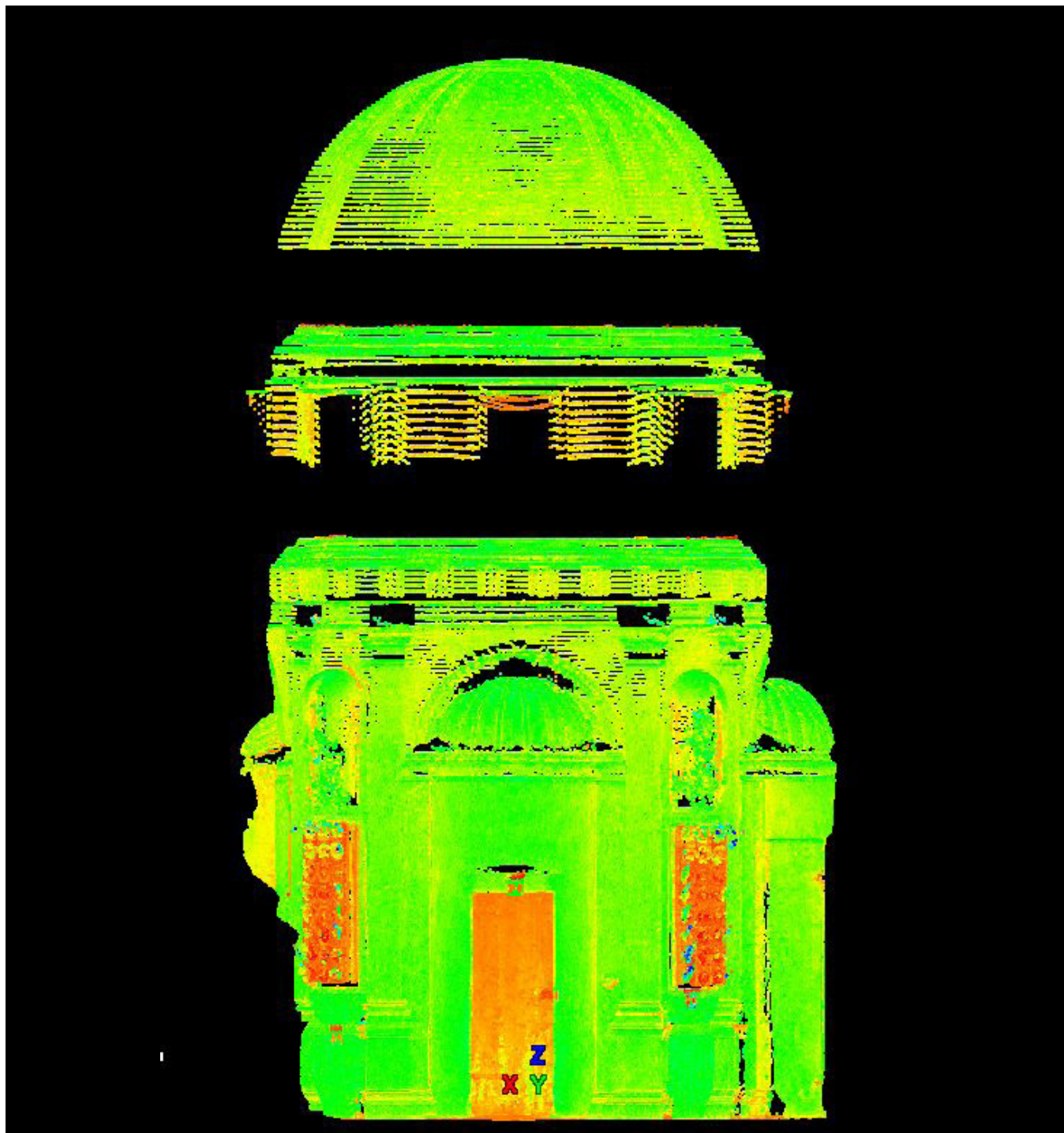
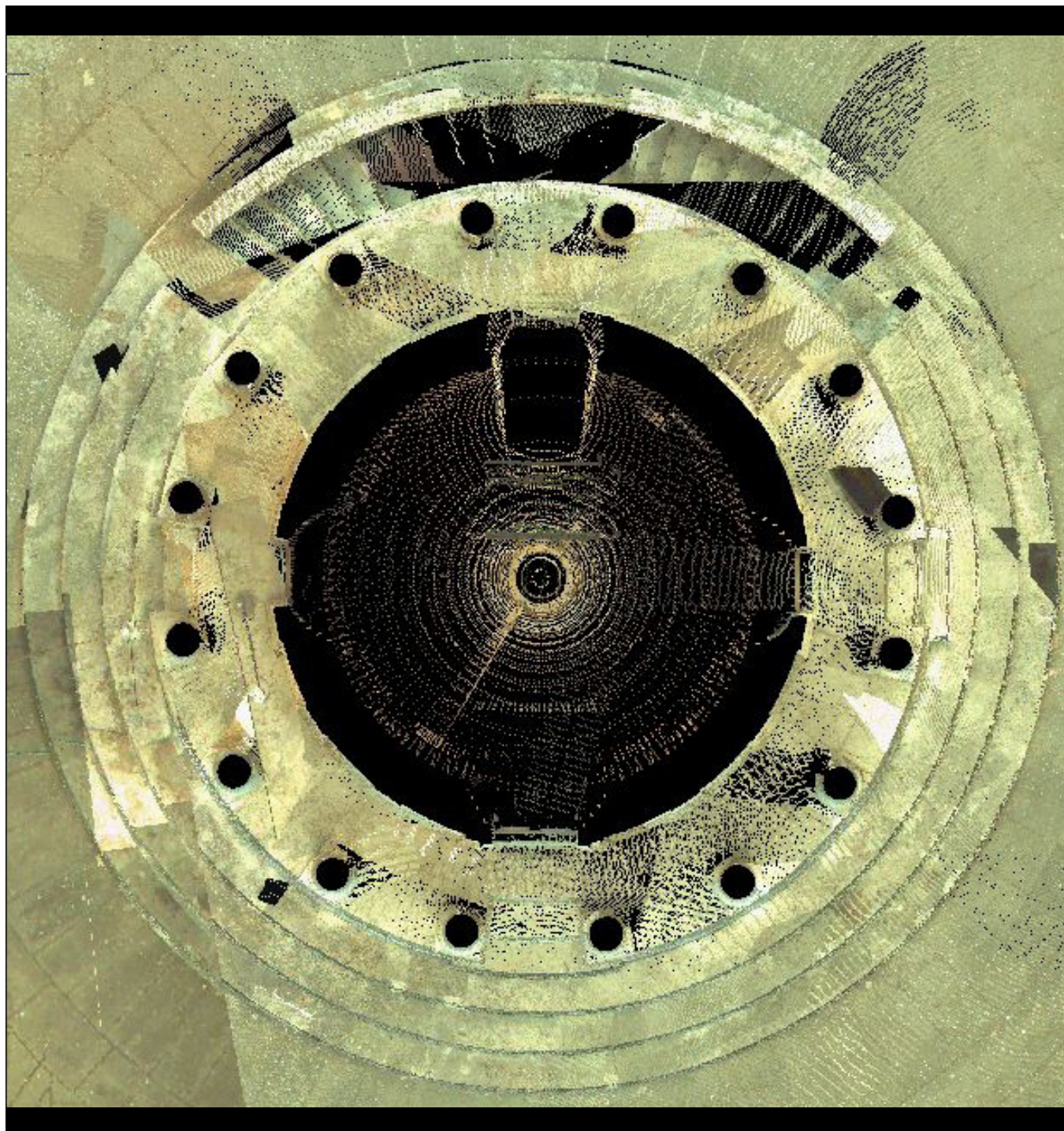


Fig. 86 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità riflettanza, sezione realizzata sulla cella del Tempietto.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 87 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb della pianta del Tempietto.*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

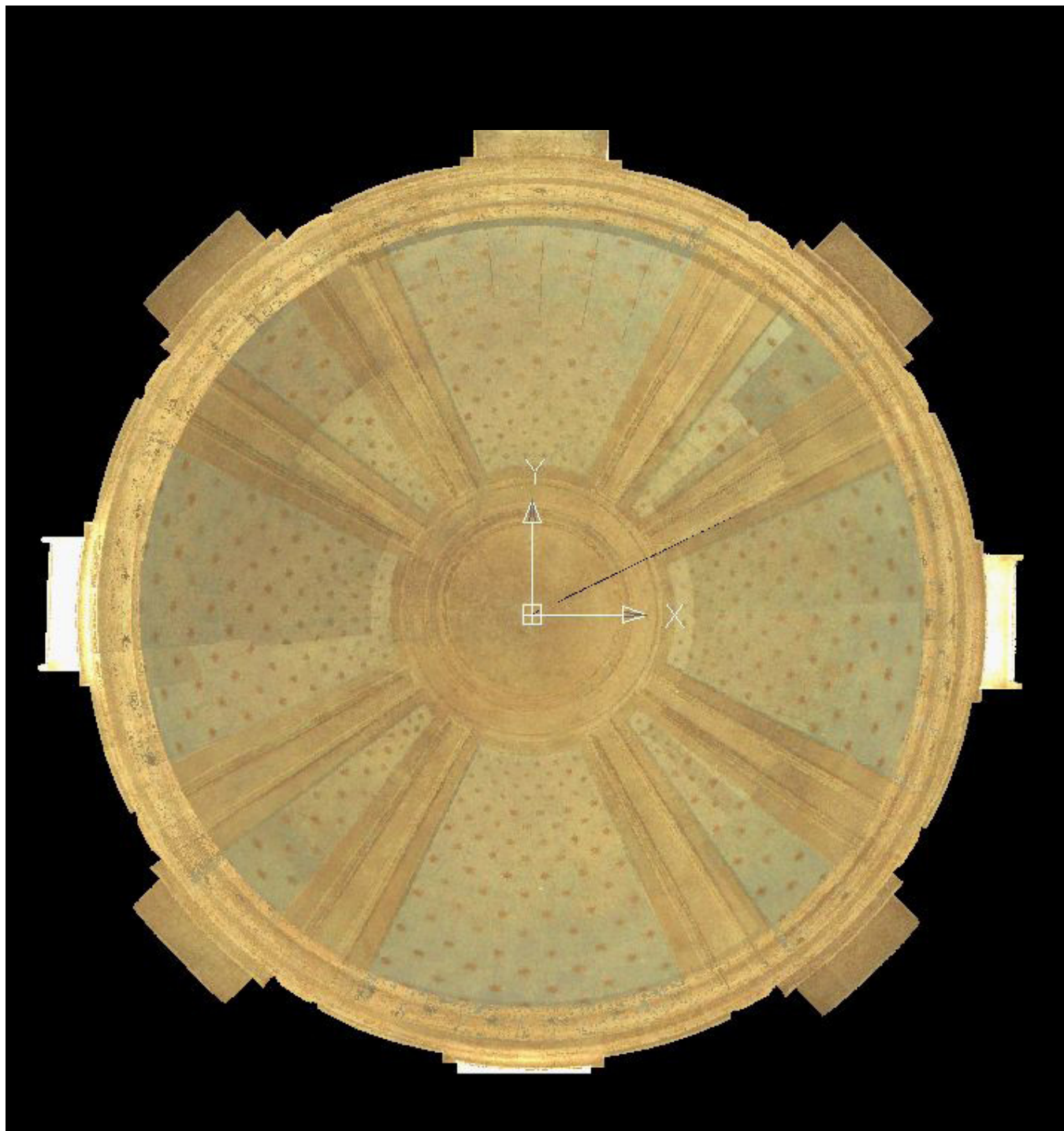


Fig. 88 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb della cupola.

“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri



Fig. 89 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb dell’altare della cella, si noti come la presenza di vetrate smeriglaite crei un effetto di sdoppiamento.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

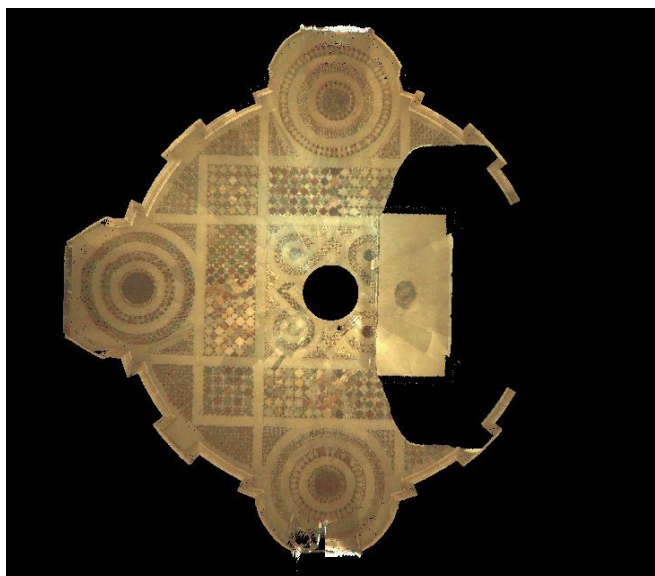


Fig. 90 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità toni di grigi odell’altare della cella del Tempietto, si noti come in questa visualizzazione le vetrate non generino errori di visualizzazione.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri



Figg.91,92 – Screen shot della nuvola di punti in colori rgb della cella del Tempietto.







“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri



Fig.93 –Fotografia del cosmatesco della cella del Tempietto, si noti come rispetto alla rappresentazione rgb della nuvola i colori risultino più freddi.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 94 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb, pianta della cripta del Tempietto.*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

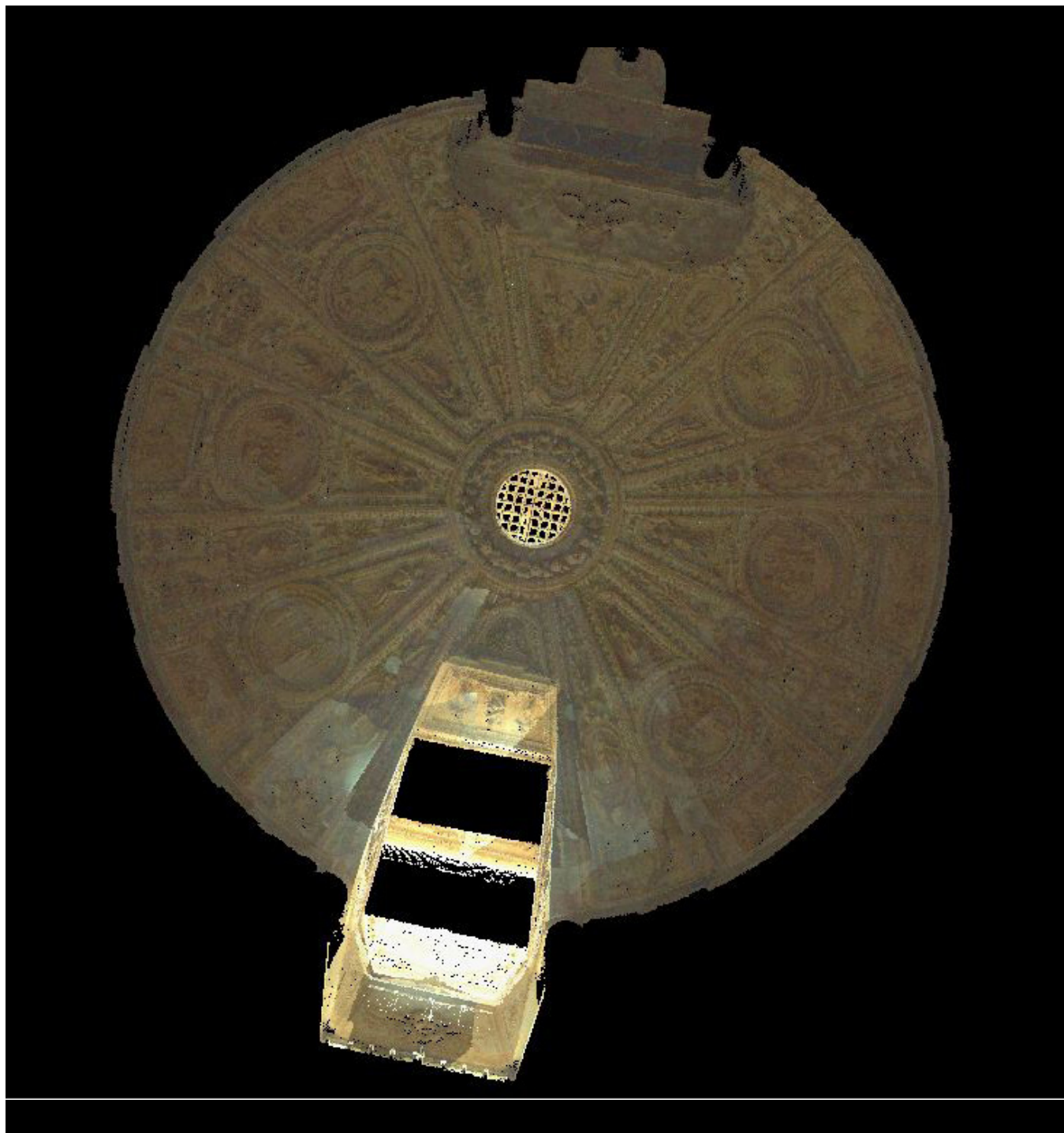


Fig. 95 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb, ipografia della cripta del Tempietto.





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 96 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb dell'ingresso della cella.*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

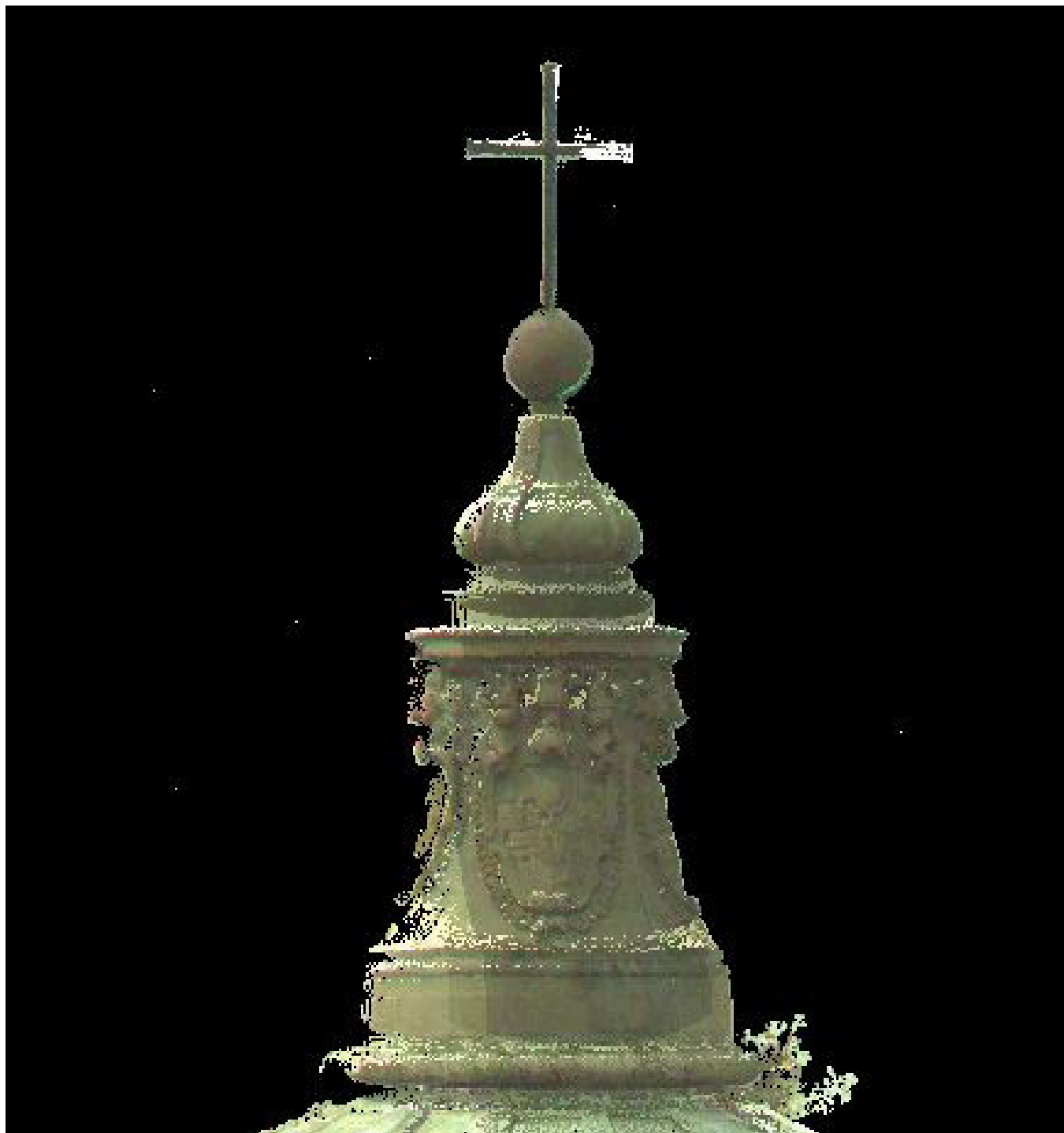


Fig. 97 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb del lanernino, si noti come nonostante siano state effettuate due riprese dall’alto la quanti di punti rilevanti non sia sufficiente alla definizione dello stesso.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

#### 3.2.4 Quarta fase: produzione degli elaborati attraverso la proiezione del modello in scala

Una volta orientata, la nuvola di punti rilevata dal laser scanner è stata importata con il software Claudworks, che permette di eseguire le elaborazioni finali in ambiente CAD, per procedere alla restituzione bidimensionale del Tempietto.

Le elaborazioni finali consistono in disegni geometrici e architettonici a due dimensioni (nel nostro caso si è optato per una restituzione geometrica in scala 1:50, con la consapevolezza che la presente ricerca può avere ulteriori approfondimenti in seguito).

Tali disegni sono propedeutici alla realizzazione di quello che poi sarà il modello tridimensionale<sup>5</sup>.

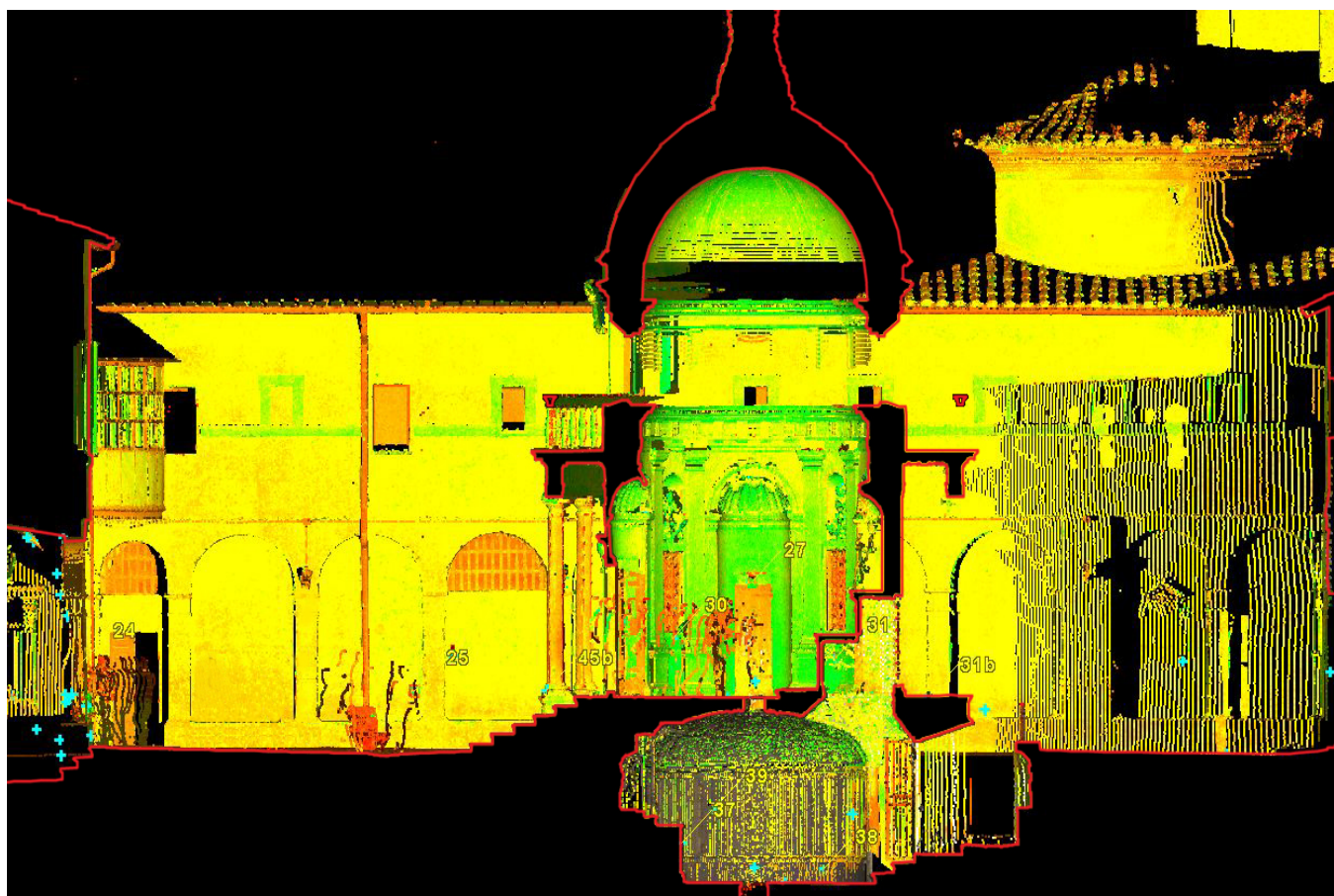


Fig. 98 – Visualizzazione della nuvola di punti in modalità rgb del lanternino, si noti come nonostante siano state effettuate due riprese dall’alto la quanti di punti rilevanti non sia sufficiente alla definizione dello stesso.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

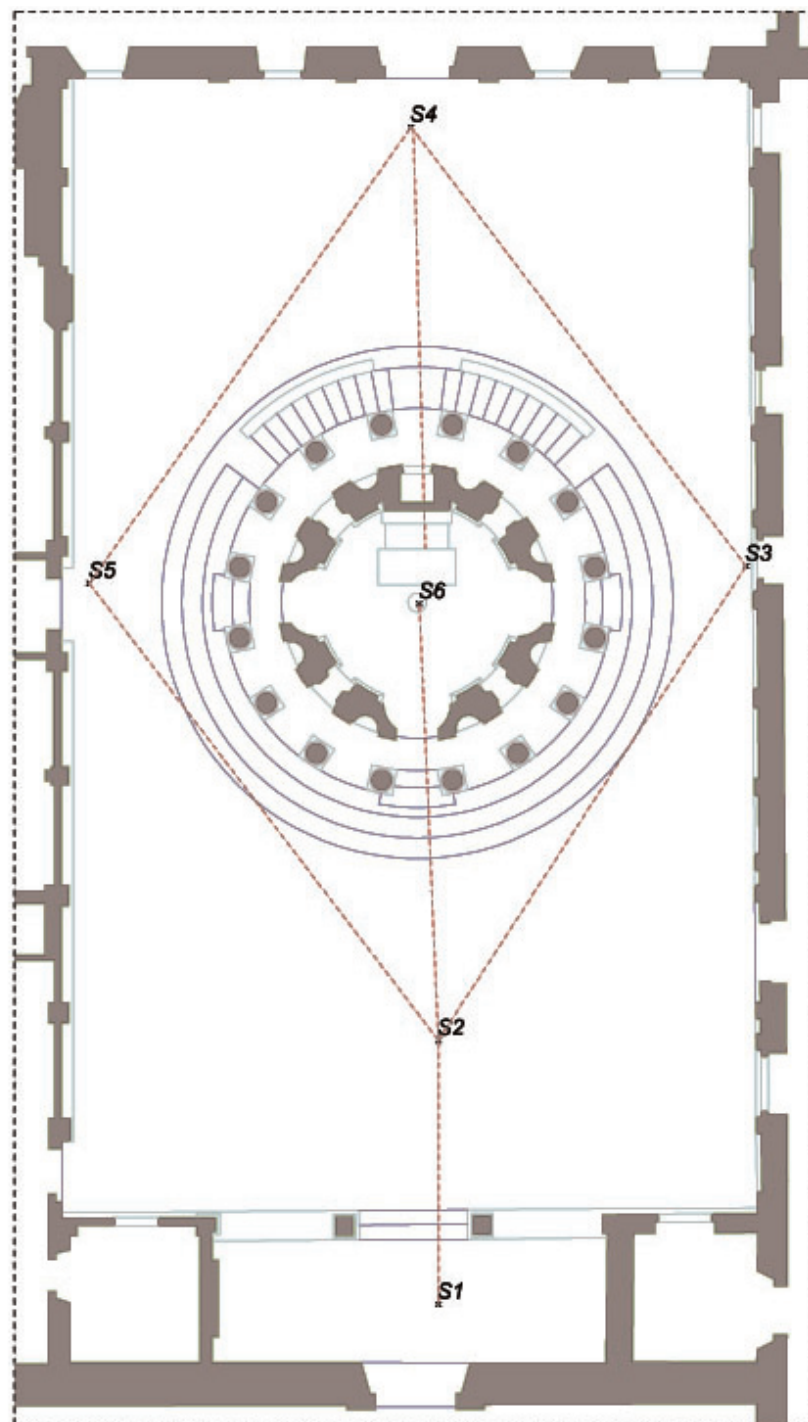


Fig. 99 – Restituzione della poligonale e della nuvola di punti in ambiente cad..



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 100– Rappresentazione del prospetto del Tempietto.*





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

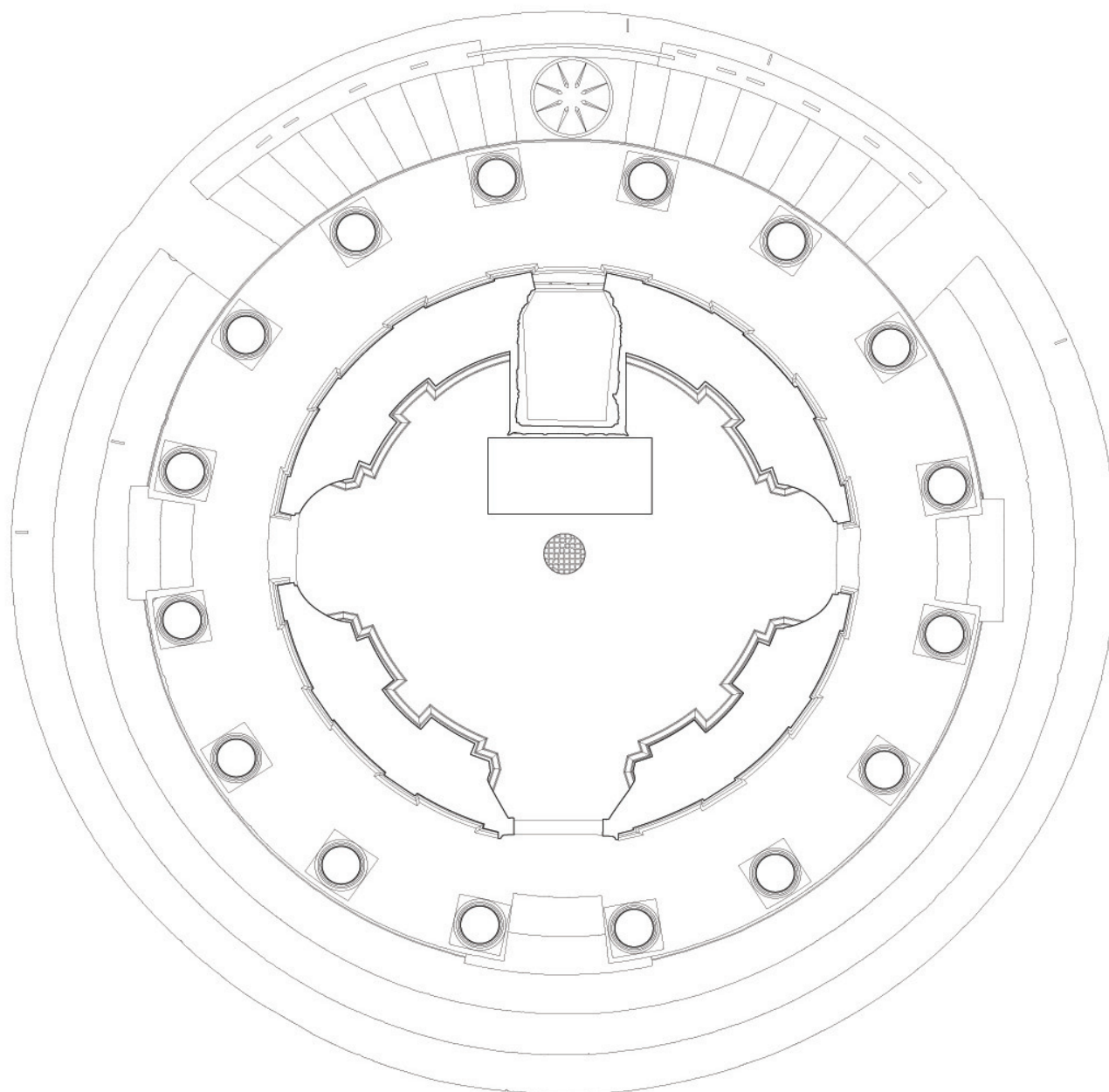
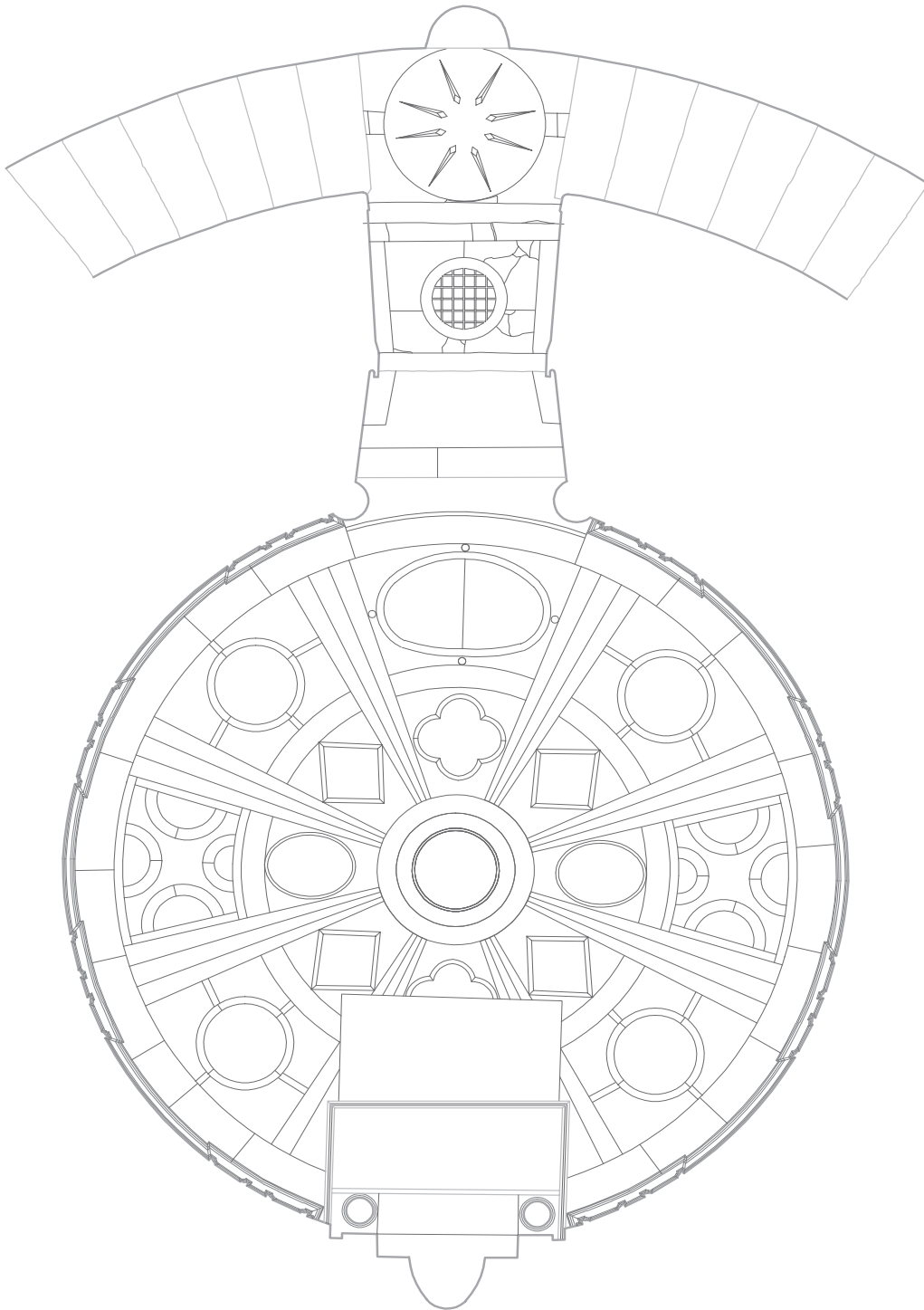


Fig. 101– Rappresentazione della pianta della cella del Tempietto.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 102 – Rappresentazione della pianta della cripta del Tempietto.*



#### *Conversione dei dati in modello 3D:*

Anche se le nuvole di punti prodotte da un laser scanner 3D possono essere immediatamente misurate e visualizzate<sup>6</sup> – e quindi direttamente utilizzate in architettura e in ingegneria costruttiva – la maggior parte delle restituzioni dei dati avviene utilizzando modelli 3D.

Esistono diverse opzioni in commercio di software in grado di realizzare questo passaggio in modo diretto o indiretto ossia direttamente dalla nuvola o realizzando altri passaggi con altri strumenti operativi.

Le prime sono rappresentate da una serie di programmi basati sull’elaborazione di mesh poligonali di cui i più noti sono Geomegic e Rapidform. Questi software diretti permettono di congiungere i punti della nuvola con segmenti che prese tre a tre generano un poligono, la sommatoria di questi piani crea un effetto di superficie che può essere raffinato e migliorato con diversi strumenti al fine di ottenere una visione tridimensionale dell’oggetto architettonico gradevole.

Le problematiche di questi software consistono nella scarsa modificabilità del dato, nella pesantezza del dato la cui conseguenza diretta consiste nella necessità di una work-station con elevate prestazioni ed infine nella problematica dei zone non rilevate dalla nuvola, i così detti coni d’ombra, che non possono essere integrati. Mentre i vantaggi consistono nella rappresentazione dello stato di fatto del monumento, visto che utilizzano tutti i dati della nuvola, e la migliore adattabilità in fase di rendering delle texture.

Al contrario quelli indiretti sono quelli che utilizzano le Nurbs (Non Uniform Rational Basis-Splines) o altre rappresentazioni topologiche come il software Rhino-

ceros. Infatti il presupposto consiste nella creazione di generatrici e direttrici partendo dalla nuvola che una volta importate nel software possono essere interpolate per creare il modello. Questo metodo risulta essere, a mio avviso, il più idoneo in quanto l’operatore deve in prima istanza osservare e riconoscere le caratteristiche geometriche di ogni singolo elemento architettonico, quindi deve conoscere e riconoscere.

Questo riconoscimento avviene nel momento in cui si realizzano i geometrici del nostro Tempio. I vantaggi dati dall’uso di questi software sono enormi in quanto si riduce notevolmente la pesantezza del dato, si può tranquillamente controllare modificare ogni singolo elemento, le superfici sono esenti dai coni d’om-

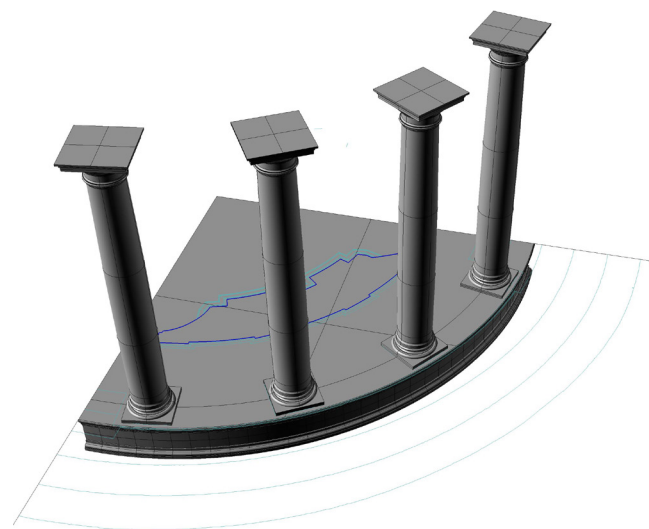


Fig. 103 – Costruzione del modello in Rhinoceros partendo dai disegni bidimensionali realizzati per questa ricerca, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.

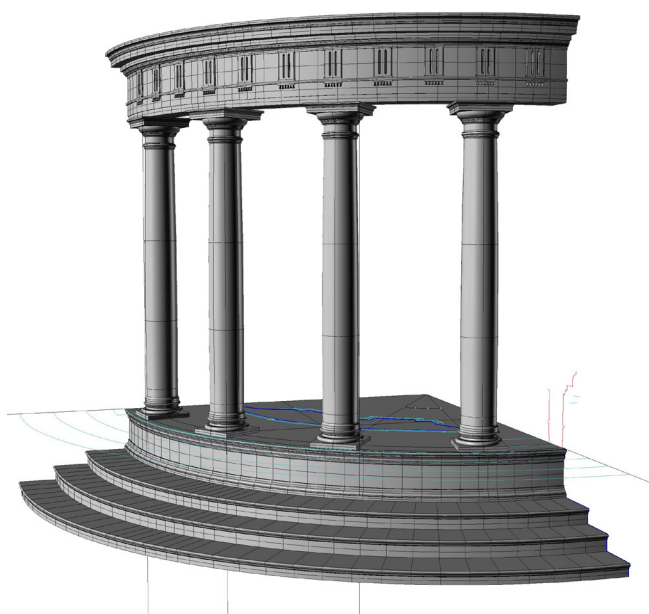


Fig. 104 – Costruzione del modello in Rhinoceros partendo dai disegni bidimensionali realizzati per questa ricerca, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.

bra ed infine rappresentano meglio la forma. I limiti di questo tipo di rappresentazione sta nelle capacità dell’operatore e nella selezione del dato che può portare ad errori inoltre essendo un tipo di rappresentazione ideale non corrisponde allo stato attuale di degrado e conservazione del manufatto architettonico.

Per la realizzazione del modello del Tempietto di San Pietro in Montorio si è scelto di utilizzare quest’ultima modalità data della metodologia indiretta delle Nurbs. Partendo quindi dai disegni geometrici, che sono stati importati in Rhinoceros, è stato realizzato un modello del Tempietto che voleva quindi rappresentare non

lo stato attuale in cui si trova il monumento ma quello che Bramante aveva pensato al momento della sua concezione.

Si poneva infine la questione del colore originale per le parti non lapidee del Tempietto per la realizzazione del rendering in Vray. Gli storici, nonché i restauratori, non sono stati in grado di fornire un’indicazione valida in tal senso e per questa ragione si è scelto un colore neutro vicino a quello naturale del travertino che è il materiale percentualmente più presente nel monumento.

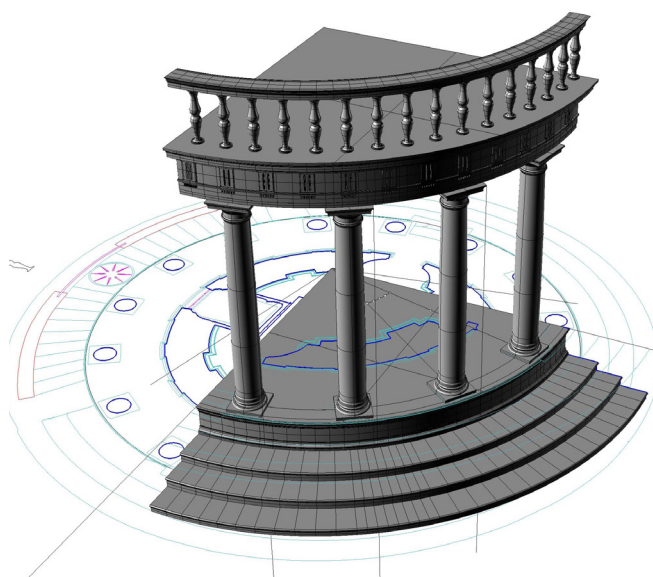


Fig. 105 – Costruzione del modello in Rhinoceros partendo dai disegni bidimensionali realizzati per questa ricerca, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### 3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

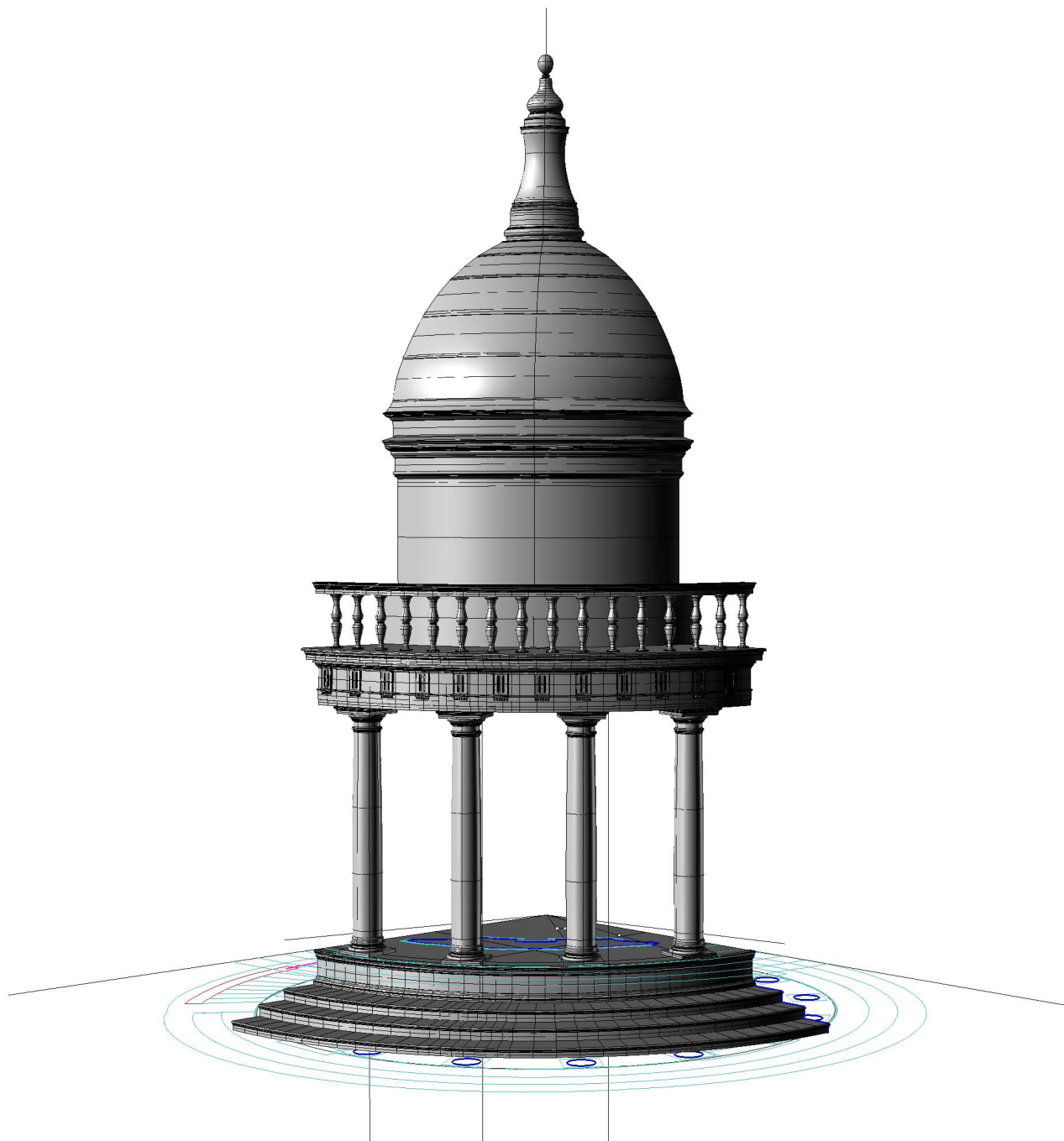


Fig. 106 – Costruzione del modello in Rhinoceros partendo dai disegni bidimensionali realizzati per questa ricerca, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 107 – Visualizzazione rendering, Vray, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.*

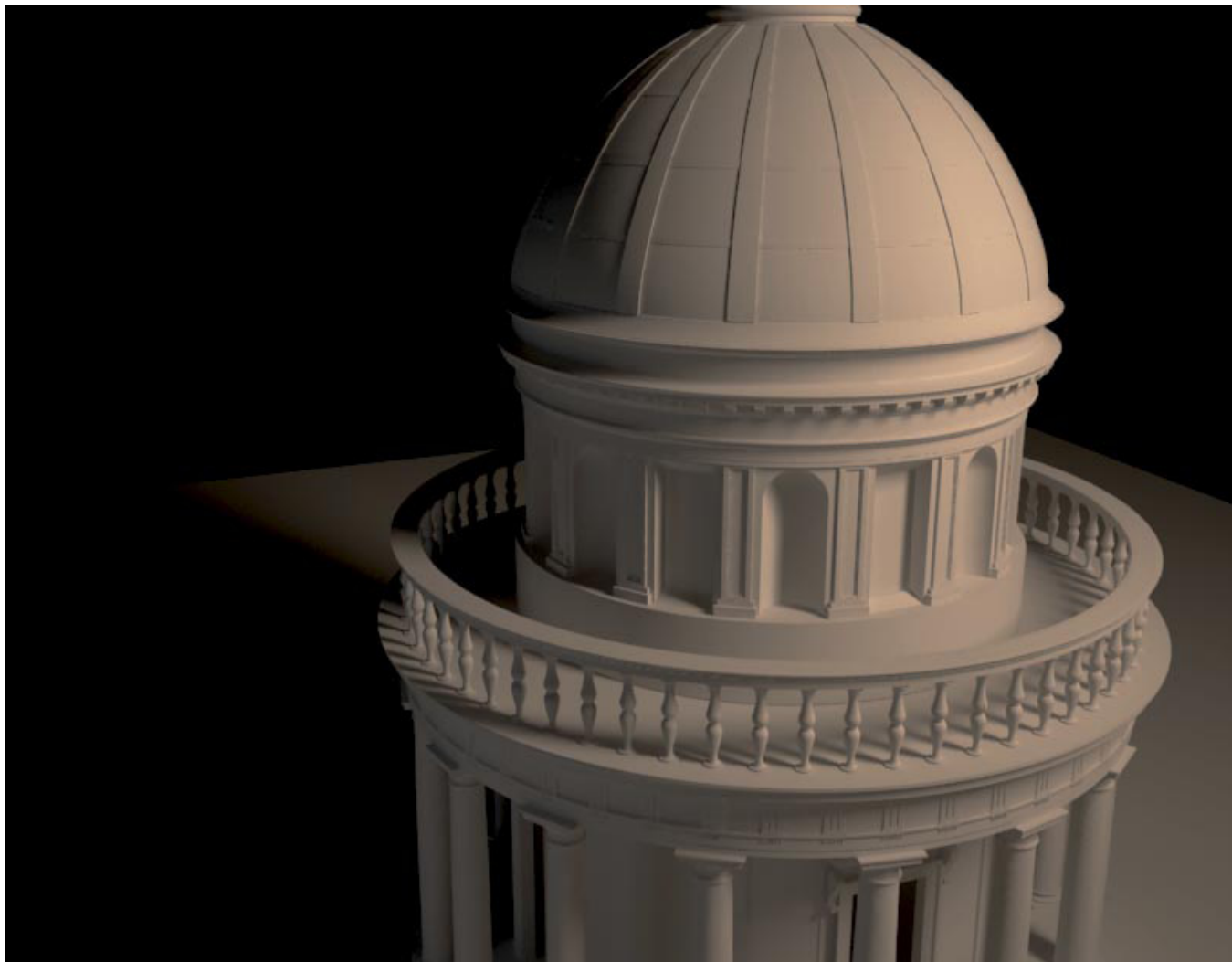




“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

### *3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio*

*Livia Fabbri*



*Fig. 108– Visualizzazione rendering, Vray, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.*





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*



*Fig. 109 – Visualizzazione rendering, Vray, elaborazione del Dott. Francesco Borgogni.*







“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

### **3. Rilievo e conoscenza del Tempietto di San Pietro in Montorio**

*Livia Fabbri*

## **NOTE**

1. Emanuela Chiavoni, “Il ruolo del rilevamento a vista nell’analisi dell’architettura”, in Mario Docci (a cura di), *Strumenti didattici per il rilievo*, Gangemi, Roma 2000, pp. 22-29
2. Fonte [www.leica-geosystem.com](http://www.leica-geosystem.com)
3. Marco Di Giovanni, “Guida al rilievo strumentale per la rappresentazione dell’architettura”, in Mario Docci (a cura di), *Strumenti didattici per il rilievo*, Gangemi, Roma 2000, pp. 64-74
4. Carlo Bianchini, “Dal reale al virtuale (e ritorno): il modello ligneo di Antonio da Sangallo il Giovane per il nuovo S. Pietro in Vaticano”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 34 del 2007, pp. 36-49.
- 5 AA.VV, *Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell’architettura e dell’ambiente*, (Gangemi editore, Roma 2002)
6. Alfonso Ippolito, “La modellazione delle superfici marmoree del Tempio del Divo Claudio a Roma”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 38 del 2009, pp. 76-85.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

#### ***4. Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di rilievo del Tempietto di San Pietro in Montorio***





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*



#### **4.1 Rilievo come conoscenza finalizzata all’analisi delle misure: raffronti con i rilievi storici**

Il termine *Rilievo* al giorno d’oggi rappresenta tutte quelle attività atte ad essere strumento di conoscenza degli elementi materiali supportate da un *corpus* teorico ormai vasto ed in eterna evoluzione.

Il processo del rilevamento tuttavia è un processo multidisciplinare che abbraccia vari livelli di conoscenza idonei alla raccolta, all’interpretazione e all’archiviazione di dati ed informazioni sia quantitative nonché qualitative. Le prime possono essere ricondotte e basate su un approccio scientifico rigoroso mentre le seconde devono essere frutto delle capacità e sensibilità interpretativa dell’operatore, che criticamente sceglie, analizza e rappresenta.

In questo senso il *Rilievo* è quindi strumento di conoscenza necessario a comprendere l’architettura, l’uomo infatti per comprendere il vero senso e significato di un’opera deve analizzare per conoscere. Quindi rilevare consente di cogliere l’essenza dell’architettura, scoprendo gli elementi generatori ed i rapporti proporzionali.

In quest’ottica il rilevamento si basa su tutte quelle attività in cui si raccolgono e catalogano tutte le informazioni necessarie per le fasi successive di analisi, elaborazione e rappresentazione.

L’acquisizione dei dati metrici rappresenta un momento molto critico ed importante e deve essere eseguito in maniera ineccepibile e deve raggiungere un elevato livello di affidabilità <sup>1</sup>.

In questo senso mi piacerebbe ricordare una delle lezioni sul rilievo del prof. Carlo Bianchini che evidenziava la necessaria scientificità di tale processo citando

do Karl Popper ed il significato di metodo scientifico. In sostanza per far sì che il Rilievo sia riconosciuto come metodo scientifico è necessario che:

- (1) l’indagine di un fenomeno condotta attraverso un insieme di tecniche
- (2) basata sulla raccolta di dati osservabili, empirici e misurabili affetti da un definito livello di incertezza controllato e dichiarato;
- (3) tali dati devono poter essere archiviati, condivisi e sottoposti a valutazione indipendente;
- (4) le procedure utilizzate devono poter essere replicabili al fine di acquisire un nuovo insieme di dati comparabili.

Quindi il rilevamento deve essere predisposto come un esperimento scientifico e deve essere replicabile in ogni sua parte. Il *corpus* dei dati raccolti quindi devono coincidere con i punti materiali dell’oggetto, devono essere empirici in quanto devono essere sperimentali, devono essere misurabili e infine devono essere affetti da un certo grado di incertezza definito dalla scelta dello strumento utilizzato.

La scientificità del Rilievo è data inoltre dalla raccolta di tutte quelle informazioni sulle varie fasi e tra queste il progetto di rilievo, il libretto di campagna, la monografia dei punti misurati e le caratteristiche degli strumenti.

Altro requisito necessario e fondamentale è la replicabilità di tale processo producendo effetti molto signifi-

ficativi poiché implica la possibilità di integrare “diacronicamente” dati acquisiti in tempi diversi spesso con tecniche diverse.

E’ evidente in tal senso la necessità di analizzare attraverso la ricca documentazione iconografica del Tempietto di San Pietro in Montorio la correttezza e l’accuratezza dei rilievi storici.

L’analisi è stata effettuata sovrapponendo gli elaborati bi-dimensionali sui disegni dei rilievi storici. Per far ciò è stato necessario prima di tutto costruire il suo modello geometrico, ovvero quella descrizione capace di sintetizzare la complessa struttura reale scomponendola in un certo numero di elementi geometrici elementari: punti, linee, superfici.

E’ evidente che tale procedimento, privilegiando le caratteristiche metriche e di posizione, comporta lo scarto di un numero molto consistente di informazioni; ciò nondimeno il modello geometrico così ottenuto, opportunamente ridotto di scala e sottoposto ad operazioni di proiezione e sezione, è suscettibile di rigorosa rappresentazione bidimensionale che, in virtù dell’enorme diffusione del codice interpretativo, risulta leggibile in forma sensibilmente omogenea da parte di un gran numero di soggetti.



Fig. 110 – Sovrapposizione del rilievo sul disegno di Sebastiano Serlio; la larghezza stessa e l’imposta del tamburo risultano alterate.

“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

#### 4. Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

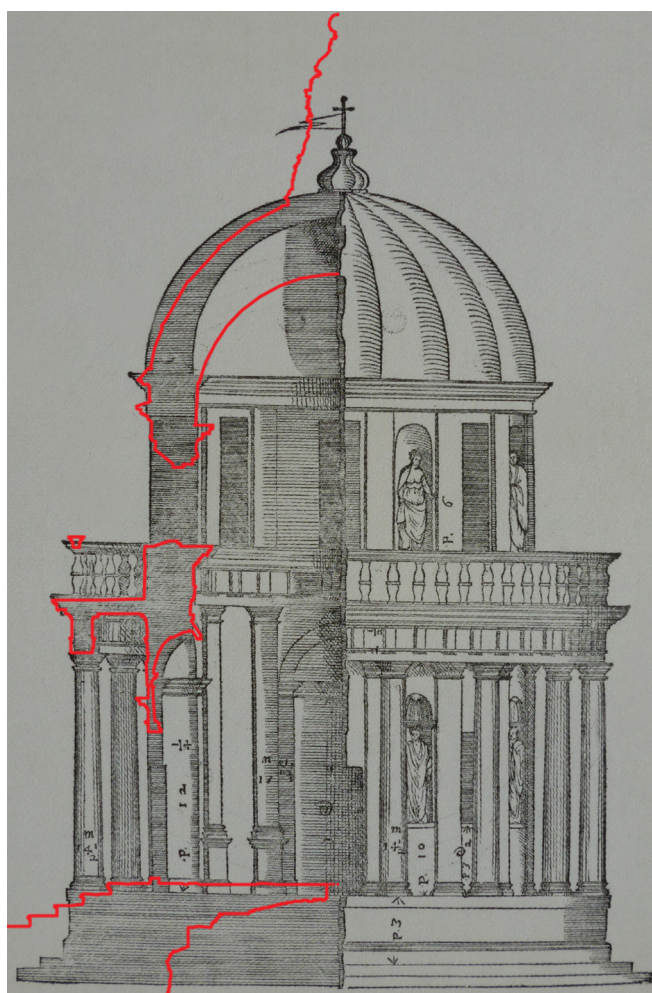


Fig. 111 – Sovrapposizione del rilievo sul disegno di Andrea Palladio; lo spessore della cupola e la sua geometria risultano alterate.

Ma non basta: la rappresentazione basata sulle precise regole proiettive genera essa stessa un modello dell’oggetto, non più tridimensionale evidentemente ma bidimensionale grafica, instaurando una precisa corrispondenza biunivoca tra i punti dell’oggetto reale ed il disegno in modo che dai primi si possa ricavare i secondi e viceversa.

La potenza dei modelli grafici travalica pertanto il concetto di codice e le sue caratteristiche di trasmissibilità, fornendo in realtà uno strumento agile e preciso per simulare sul modello operazioni in seguito fedelmente riproducibili sull’oggetto reale.

Verificando la numerosa presenza nell’iconografia storico di particolari rappresentazioni del Tempietto in prospetto ed in sezione si è scelto di realizzare sovrapposizioni solo su queste due tipologie bidimensionali. Ne risulta che in alcuni casi il distacco maggiore si verifica nella cupola dove evidentemente l’impossibilità di misurare in maniera diretta ha fatto sì che si riscontrassero i maggiori distacchi. Altro punto critico è la rappresentazione del lanternino che non solo appare fuori scala ma di dimensioni maggiori anche in virtù dei restauri e modifiche che ha subito.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

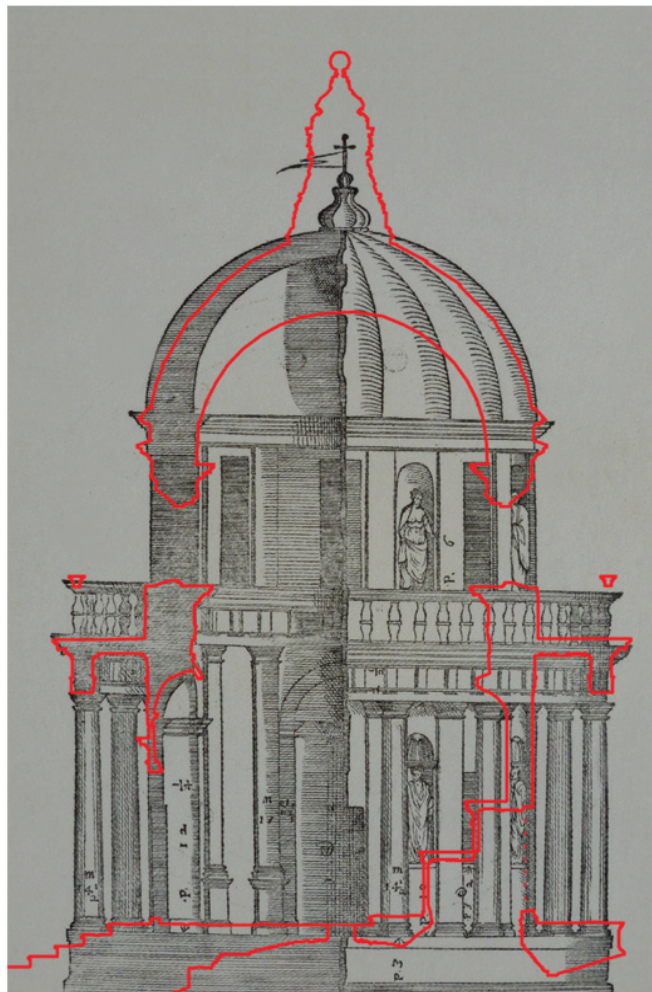


Fig. 112 – Sovrapposizione del rilievo sul disegno di Andrea Palladio; lo spessore della cupola e la sua geometria risultano alterate.



Fig. 113 – Sovrapposizione del rilievo sul disegno di Letarouilly; lo dimensione longitudinale risulta alterata



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

#### 4. Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

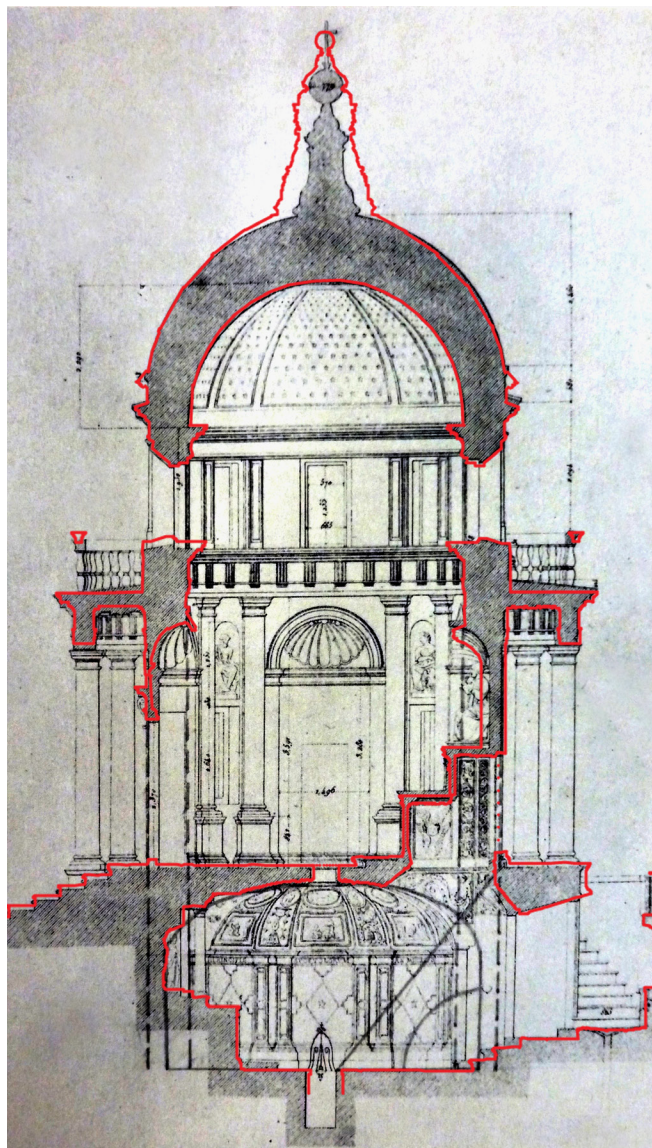


Fig. 114 – Sovrapposizione del rilievo sul disegno di Letarouly; lo sezione appare quasi perfetta solo l’altezza del balaustrino è diversa.

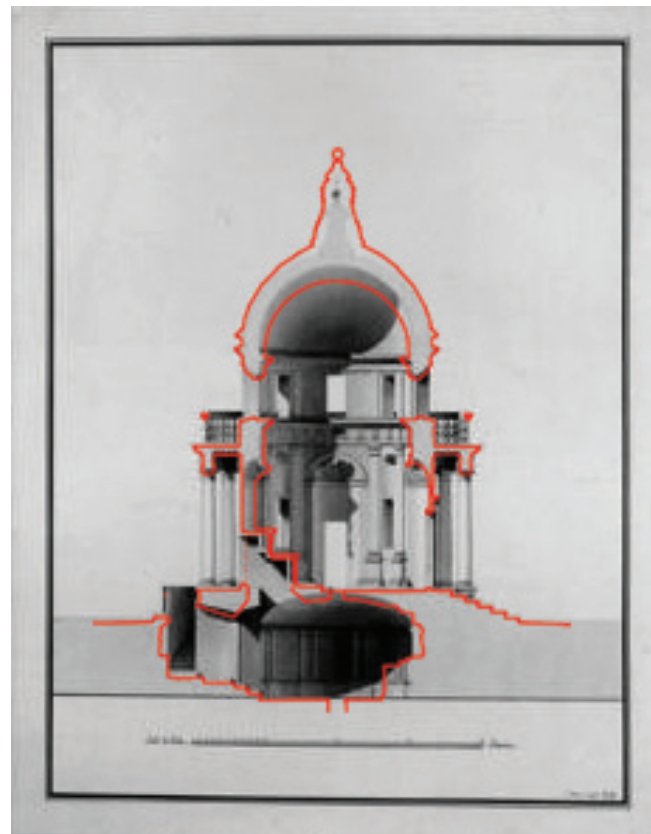


Fig. 115 – Sovrapposizione del rilievo sul disegno di Giuseppe Marini 1810; lo sezione appare quasi perfetta solo nel posizionamento della cripta e nella sua dimensione troviamo degli scostamenti



“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

#### **4.2 La riflettanza come strumento di analisi della materia ai fini del restauro**

Per poter parlare della riflettanza<sup>2</sup> dobbiamo prima richiamare alcuni concetti base e caratteristici dei raggi laser per capire come le peculiarità degli stessi la influenzino. Dal punto di vista applicativo il laser è un’apparecchiatura che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce laser colorata a seconda della lampadina utilizzata) e composta da molte frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all’occhio umano (monocromaticità).

La radiazione riflessa è data a sua volta caratteristiche intrinseche del materiale, dal suo stato di conservazione e dall’aspetto della superficie. I materiali infatti assorbiranno e trasmetteranno una certa quantità di radiazione che quindi dobbiamo sottrarre a quella incidente per poter ottenere quella riflessa.

All’interno del scanner laser abbiamo un fotodiodo ricevitore che percepirà uno di questi raggi e ne potrà misurare la sua intensità. Il dato così ottenuto verrà associato ad ogni singolo punto rilevato. Otteniamo un valore in falsi colori che distingue a temperatura costante e a distanza costante i diversi materiali che compongono il monumento rilevato. Il valore di riflettanza si traduce quindi in una variazione cromatica dei punti acquisiti permettendo di percepire la nuvola di punti come mappata.

Il software a corredo dello scanner laser visualizza i risultati di scansione e codifica la riflettanza delle superfici con valori indicati con DN (Digital Number) compresi tra 0 e 255. Al valore 0 corrisponde riflettanza nulla; si riferisce a quei corpi che assorbo-

no completamente il raggio laser senza rifletterlo, i corpi neri ad esempio, mentre il valore 255 indica la riflettanza massima. Una superficie chiara risponde con un segnale più forte di una superficie scura; un materiale poroso assorbe più luce di uno compatto o la stessa superficie risponde in maniera differente se impregnata di acqua o di umidità. L’unità di misura è espressa in cd/m<sup>2</sup>.

Attualmente non esistono delle tabelle di riferimento sul comportamento dei materiali, quindi tutte interpretazioni che si possono fare devo poi essere supportate da analisi chimico-fisiche sue materiali.

L’analisi del dato della riflettanza su materiali omogenei permetterebbe quindi di determinare le caratteristiche delle superfici in base alla natura e allo stato di degrado del materiale. Infatti se punti della stessa natura danno risposte differenti c’è evidentemente una ragione che lo induce a comportarsi in questo modo e questo è un elemento che non può essere sottovalutato perché permette di indagare lo stato delle superfici.

Il colore della scansione laser è quindi indice delle proprietà fisico chimiche del materiale e le variazioni dei colori rappresentano la differenza tra le caratteristiche degli elementi costruttivi, rendendo la scansione, strumento utile per la realizzazione di mappe utili al fine del restauro come per la scelta delle indagini diagnostiche da compiere sui materiali. Il dato della riflettanza è, come sappiamo, il rapporto tra l’intensità della radiazione riflessa dal materiale in esame e della radiazione incidente e può variare quindi a seconda dello stato del materiale, infatti più è degradato e più risulterà assorbente e viceversa.

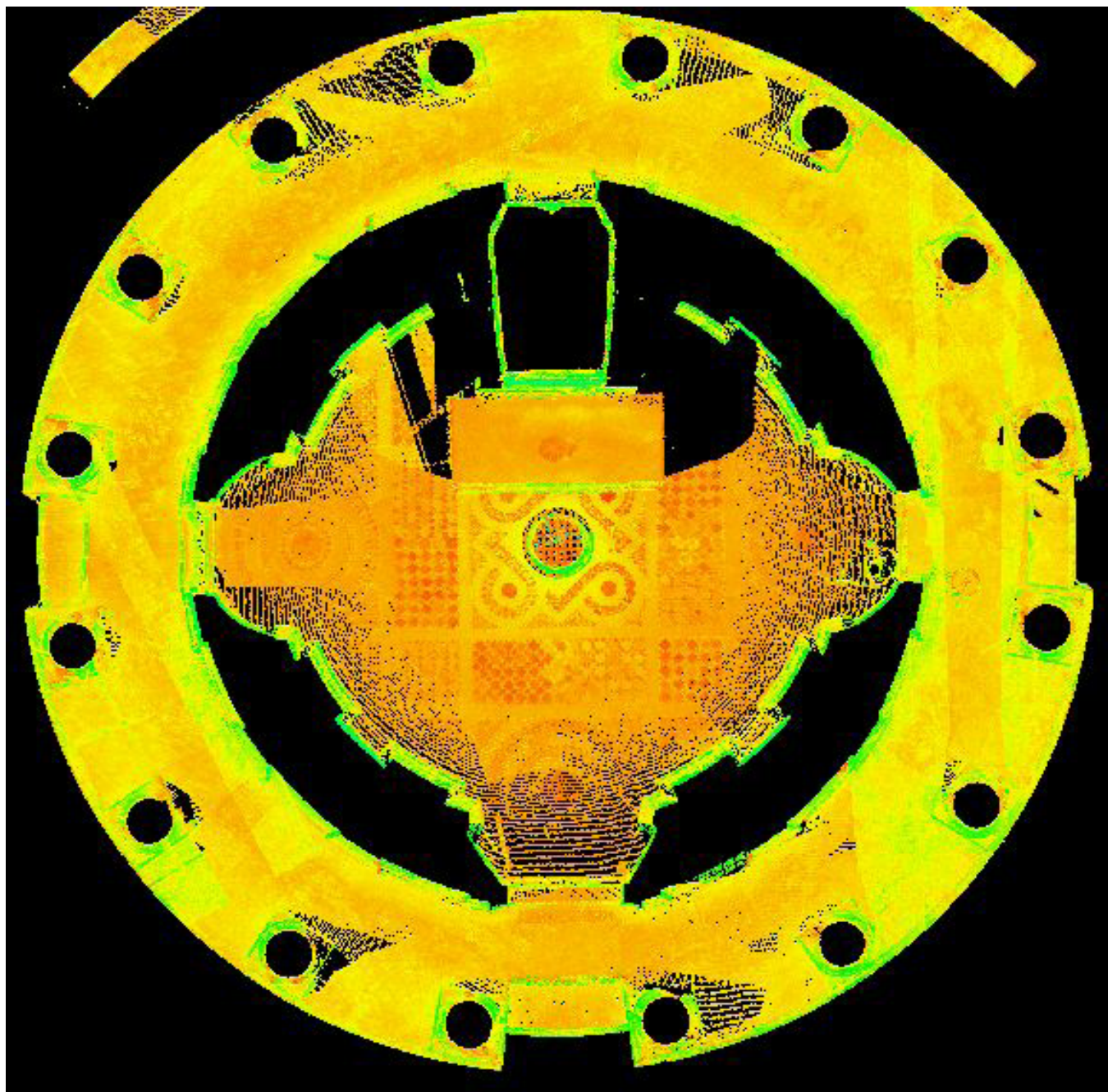




“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

**4. Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di San Pietro in Montorio**

*Livia Fabbri*



*Fig. 116 – Prianta in dato di riflettanza. del Tempietto di San Pietro in Montorio.*

I risultati delle osservazioni effettuate sul dato della riflettanza eseguite sul Tempietto sono in ogni caso un buono punto di partenza per futuri studi di analisi più specifici per quanto riguarda le analisi chimico fisiche che si potrebbero eseguire, da parte di restauratori, sul monumento.

Innanzitutto partendo dall’alto il comportamento della ghisa, che fino ad adesso era risultato un materiale del tutto assorbente e quindi sconsigliato da rilevare con il laser scanner in questa occasione si ha risposto bene alle operazioni di rilievo non creando errori.

Per quanto concerne il travertino non è risultato affetto da forme di degrado, non essendovi presenti alterazioni cromatiche della riflettanza, dato che conferma il buono stato degli elementi lapidei forse dovuto al recentissimo restauro adoperato dall’ICR.

Lo stato degli intonaci è risultato anch’esso buono tranne in alcune zone specifiche dove sono stati riscontrate alterazioni dovute alla presenza di umidità ma questo dato andrebbe riverificato con una successiva ripresa visto che quella che è stata effettuata per questa ricerca si è svolta durante giornate particolarmente umide ed a ridosso di precipitazioni atmosferiche.

Gli stucchi, realizzati in gesso materiale notoriamente soggetto a degrado elevato, di inestimabile valore per la loro consistenza artistica presenti nella cripta non sono risultati essere affetti da alcuna forma di degrado. All’interno della cripta inoltre durante il restauro degli anni novanta era stato effettuato un carotaggio per analizzare lo spessore murario della stessa in seguito richiuso. Mancando la documentazione sulla lo-

calizzazione di questo carotaggio si è proceduto alla variazione del dato della riflettanza in Cyclone tenendo di individuare la sua localizzazione. Il *software* infatti permette di modificare l’indice di assorbimento dei materiali. Purtroppo questo tentativo è risultato vano in quanto le superfici erano intonacate e protette da una vernice lucida che probabilmente ha alterato la ripresa del dato.

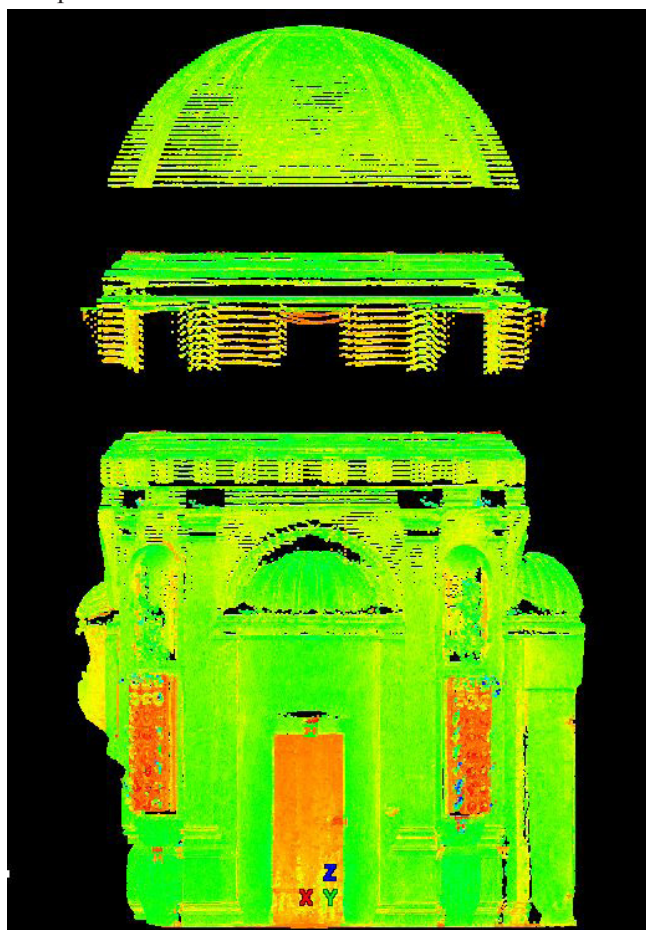


Fig. 117 – Sezione in dato di riflettanza della cella del Tempietto.



#### 4.3. *La presa dei dati per lo studio delle misure*

Il Tempio di San Pietro in Montorio da un punto di vista metrologico<sup>3</sup> è stato analizzato in innumerevoli saggi di storia dell’architettura. A partire da Arnaldo Bruschi sono state fatte molte ipotesi sul concepimento metrico bramantesco. La stragrande maggioranza delle analisi sono sempre state effettuate sui rilievi di Paul-Marie Letarouilly eseguiti alla metà dell’Ottocento. Storici come Gunther ipotizzavano l’uso del palmo romano (22,2 cm.) mentre Tiberi era propenso all’uso del braccio romano (44,4 cm) che corrisponde a due palmi e mezzo, Bruschi al contrario ha ipotizzato l’uso del diametro della colonna come strumento modulare di proporzionamento. Queste ipotesi sono state realizzate sulle tavole presenti in *Édifices de Rome moderne* di Paul-Marie Letarouilly e probabilmente rappresentano il miglior rilievo a fini documentali della storia degli edifici di Roma. In quest’ottica sorgerà la necessità di eseguire un rilievo con le nuovissime tecnologie che fosse da un punto di vista metrico il più vicino alla realtà e che quindi permettesse un’analisi completa il più possibile vicino alla realtà.

Infatti come abbiamo visto esistono delle ipotesi sul concepimento basate sul piede romano, sul palmo e sul braccio, ma risulta evidente come esse debbano essere confutate. Sembrerebbe più logico che essendo arrivato da poco da Milano il Bramante, nonostante la sua formazione urbinata, abbia utilizzato il braccio o il piede lombardo.

Come sappiamo Donato Bramante era giunto da poco a Roma ed aveva progettato e costruito il chiostro di Santa Maria della Pace ed anche lì utilizzò il braccio lombardo che risulta essere l’unità di misura di riferimento progettuale. Le misure dell’epoca in uso a

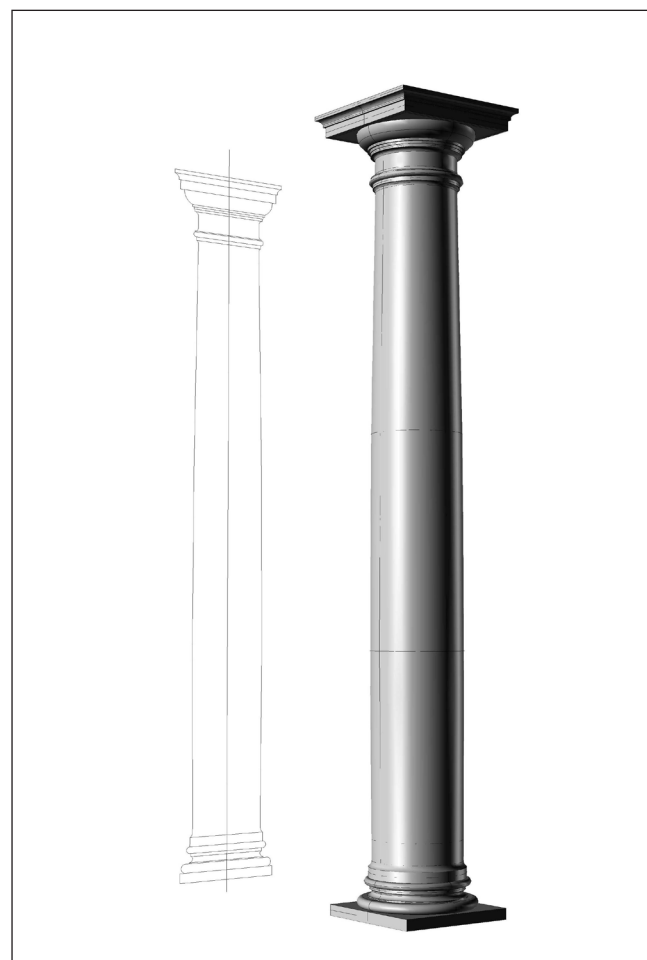


Fig. 118 –Ordine dorico del Tempio modellato con Rhinoceros.

Milano erano il braccio lombardo 59,49 cm. mentre il piede lombardo era di 43,5 cm.

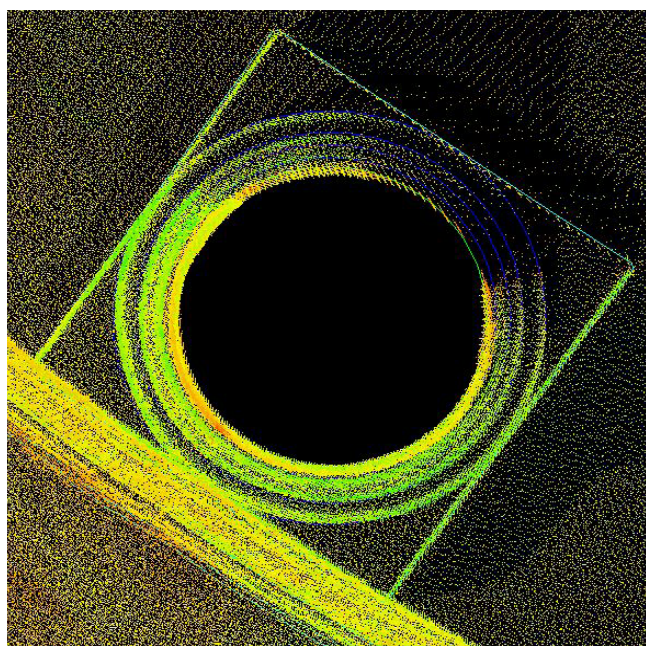
L’approccio di questa analisi voleva tendere a verificare quale fosse l’unità metrica utilizzata in fase progettuale dal Bramante. Durante il Rinascimento

in architettura infatti si cercava di definire attraverso rapporti armonici e trame geometriche i moduli che servivano da misura unitaria. Donato Bramante è uno degli anticipatori del Barocco ma la sua formazione è avvenuta durante il Rinascimento ed il largo diffondersi di trattati, compresa la conoscenza del trattato Vitruviano, di architettura sull’uso degli ordini e sull’uso del proporzionamento modulare diviene patrimonio culturale di molti architetti.

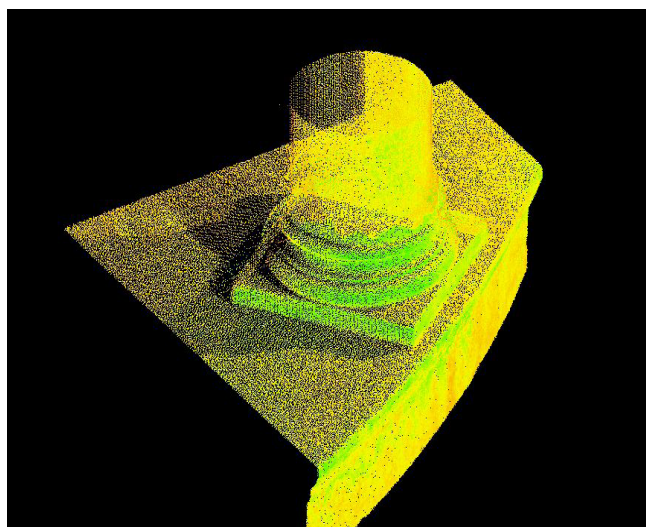
Il rilevamento attraverso il laser scanner in questo senso si è mostrato di grande ausilio in quanto sia l’accuratezza delle misure quanto la possibilità immediata di sovrapporre misure su griglie, che definiscono il modulo, l’ordine architettonico ha permesso di verificare con una certa maneggevolezza le ipotesi sul concetto di progettazione modulare.

L’analisi e la verifica è stata realizzata sull’ordine dorico perché come visto in precedenza i restauri hanno modificato sia la cupola come i balustrini.

Nel complesso sono state delle indagini partendo in prima istanza dal diametro delle colonne, anche se per alcuni studiosi forse sono di spoglio dato che il materiale granitico non è presente all’epoca nelle cave romane inoltre è differente rispetto a tutto il Tempio che è realizzato in travertino. Questo primo esperimento ha verificato che il diametro della colonna non è stato utilizzato come modulo progettuale il che avallerebbe l’ipotesi che le colonne stesse siano di spoglio. Le altre due prove sono state realizzate partendo dal piede lombardo e dal braccio lombardo e qui sono stati riscontrati degli allineamenti rispetto alle linee fondamentali dell’ordine dorico ricorrendo anche ai sottomultipli.



Figg. 119,120– Ordine dorico del Tempio diametro di base colonna che misura 38,9 cm.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

#### 4. Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di San Pietro in Montorio

Livia Fabbri

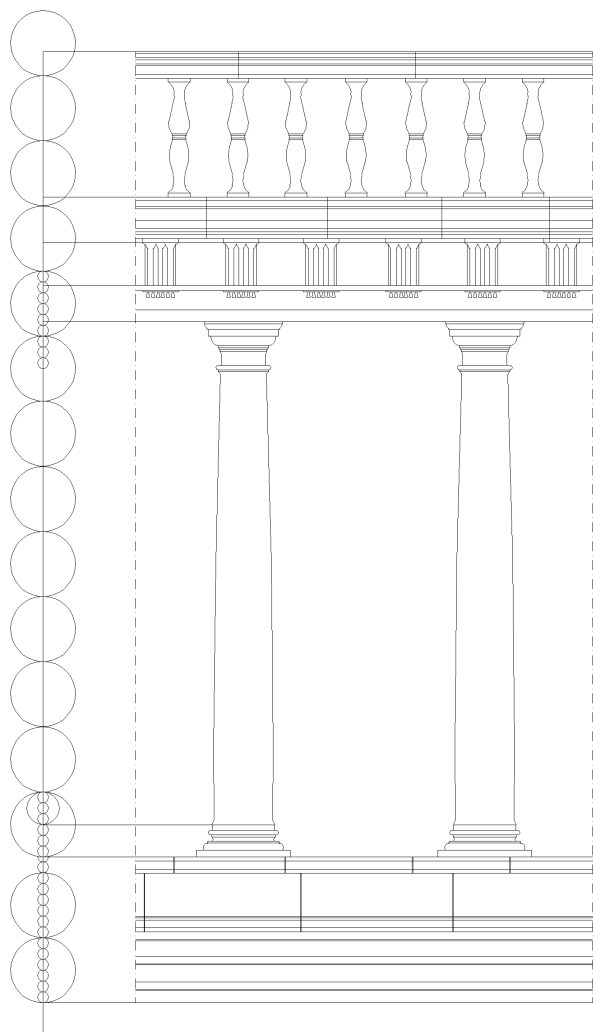


Fig. 121 – Ordine dorico del Tempietto diametro di base colonna che misura 38,9 cm. utilizzato come modulo, funziona fino alla base della colonna poi bisogna ricorrere ai sottomoduli per poter riscontrare degli allineamenti. (Ipotesi di Arnaldo Bruschi)

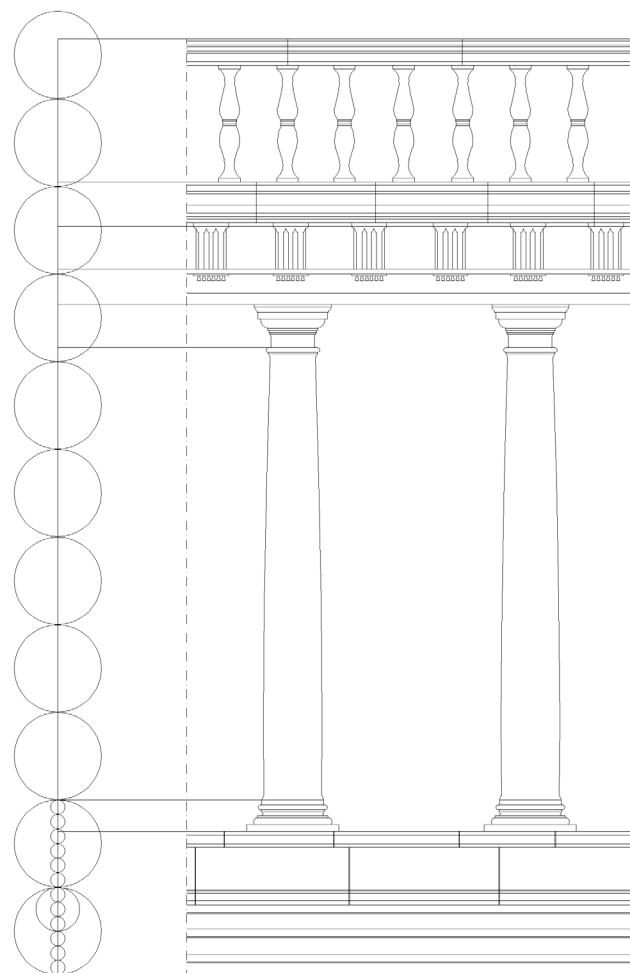


Fig. 122 – Ordine dorico del Tempietto proporzionato in base al braccio lombardo 59,49 cm. anche in questo secondo caso riscontriamo degli allineamenti basati sui sottomoduli.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

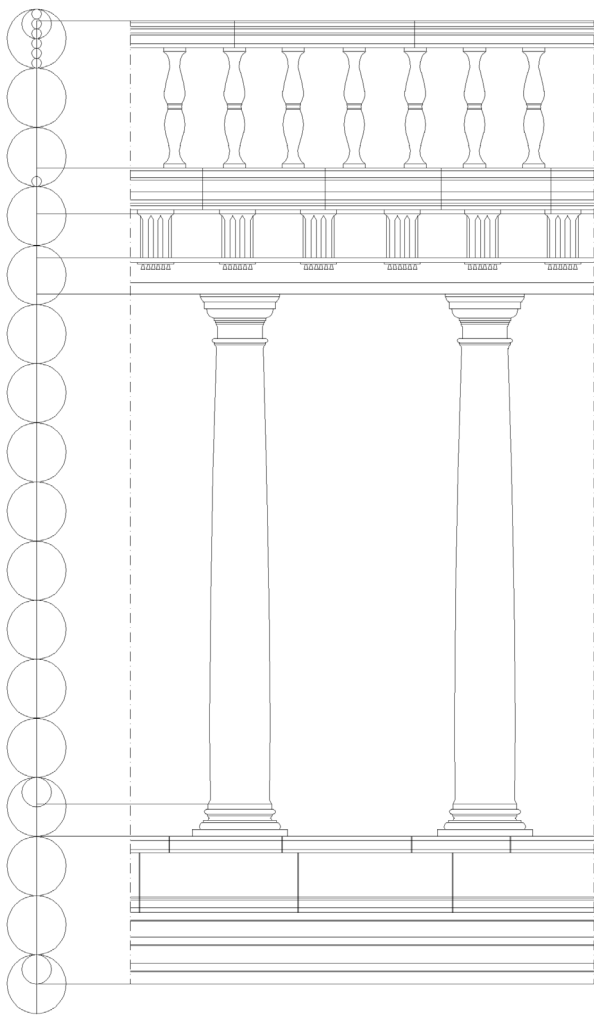


Fig. 123 – Ordine dorico del Tempietto proporzionato in base al piede lombardo 43,5- cm. anche in questo secondo caso riscontriamo degli allineamenti basati sui sottomoduli.

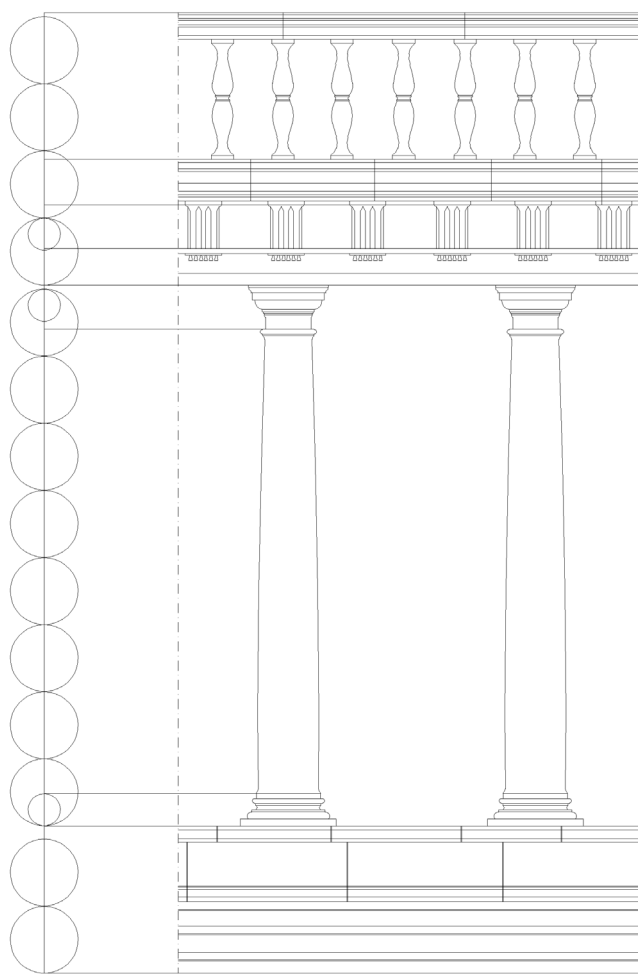


Fig. 124 – Ordine dorico del Tempietto proporzionato in base al palmo romano 22,2 cm. anche in questo secondo caso riscontriamo degli allineamenti basati sui sottomoduli ma in questo caso gli allineamenti risultano essere maggiori rispetto ai precedenti.







“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

**4. Struttura, materia e forma dell’architettura: proposta di analisi dei dati di San Pietro in Montorio**

Livia Fabbri

## **NOTE**

1. Sulla metodologia e sul concetto di reiterabilità vedere: Carlo Bianchini, “Rilievo e metodo scientifico”, in *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo*, Gangemi, Roma 2012, pp. 391-400 ed anche Carlo Bianchini, “Rilievo e metodo scientifico”, in *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo*, Gangemi, Roma 2012, pp. 391-400.

2. Mario Docci, Diego Maestri, Manuale di rilevamento architettonico e urbano, Laterza 2009

3. op.cit. Mario Docci, Diego Maestri Manuale di rilevamento architettonico e urbano, Laterza 2009





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

## Conclusioni

Alla luce di quanto testimoniato dalla presente ricerca – nelle varie componenti di: presentazione della tecnologia di rilevamento laser scanner / compilazione degli elementi storico-architettonici del Tempietto del Bramante / resoconto del rilievo del Tempietto stesso, nelle sue fasi di progettazione, esecuzione e restituzione in forma di dati – possiamo affermare che il metodo laser scanner, se utilizzato con perizia, può essere un valido strumento di rilievo per la conoscenza di manufatti architettonici.

Possiamo altresì aggiungere che i dati che tale tecnologia ci può destinare non sono da considerarsi fini a se stessi. Per assumere valore assoluto, possono:

- essere resi oggetto di comparazione con i rilievi storici, a fine di verifica degli stessi (struttura),
- fornire coordinate di lavoro per accurate analisi chimico-fisiche dei materiali, anche per un’attenta valutazione dello stato dei manufatti, in vista di possibili interventi di restauro (materia),
- essere resi disponibili per approfondimenti in materia di proporzionamento modulare (forma)

Calandoci nel contenuto specifico della nostra ricerca, i risultati ottenuti spingono a far sì che uno studio più approfondito del Tempietto del Bramante prosegua in tutti i fronti.

La comparazione dei rilievi eseguiti col laser scanner con i rilievi storici ha mostrato discrepanze fondamentali, ma anche elementi di contiguità (se pensiamo alla quasi assoluta precisione dei disegni di Paul-Marie Letarouilly, al netto delle successive modifiche alla cupola e al lanternino).

Quali altre considerazioni potrebbero portare ulteriori studi sul Tempietto? È possibile, ad esempio, ideare un diverso progetto di posizionamento delle stazioni dello strumento?





“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*

Che dire delle ipotesi di lavoro che potrebbero scaturire dall’analisi dei colori delle superfici del Tempietto? Non sarebbe auspicabile effettuare nuovi rilievi, da eseguire in diverse condizioni di luce, temperatura e umidità, per un’analisi più scientifica della riflettanza?

O, ancora, per entrare nel tema delle ipotesi metrologiche degli storici dell’architettura: se tutte le proposte di identificazione di un ordine architettonico del Tempietto si sono rivelate incapaci di includere il manufatto nella sua interezza, non si può pensare di formularne delle nuove, che prendano il via da differenti unità metrologiche?

È proprio per quanto detto finora che il presente lavoro vuole ribadire l’importanza dell’interazione sinergica fra diverse discipline scientifiche, a livello di scelta e utilizzo della strumentazione tecnologica, di progettazione ed esecuzione di campagne di acquisizione dati e, infine, di consequenzialità delle discipline stesse nel processo di avvicinamento alla conoscenza.





## ***BIBLIOGRAFIA SINTETICA PER ARGOMENTI***

### ***Testi di riferimento sul Tempio di San Pietro in Montorio***

Costantino Baroni, Bramante, 1944 Bergamo

Sandro Benedetti, Lo spazio architettonico in Bramante, in Bramante tra Umanesimo e Manierismo, Roma, 1970

Stefano Borsi, Bramante: Catalogo critico, Electa, Milano 1989 pp. 49-77, 251-258

Arnaldo Bruschi, Bramante Architetto, Laterza, Bari 1969 pp. 463-527, 986-1035

Arnaldo Bruschi, Note bramantesche, Roma, 1966

Flavia Cantatore, San Pietro in Montorio: la chiesa dei Re Cattolici, 2007 Roma

Giuseppe Caronia, Ritratto di Bramante, Laterza, Roma 1986

De Fusco G. – Scalvini M.L., Segni e simboli del tempio di Bramante, in Studi Bramanteschi, De Luca editore, Roma, 1974 pp. 503-512

Delfini G. - Pentrella R., S. Pietro in Montorio, in Fabbriche romane del primo ‘500-cinque secoli di restauri, Roma, 1984, pp. 17-110

Adriana Della - Daniela Fondi, S. Pietro in Montorio una rilettura bramantesca, in L’architettura, 12, 1973 pp. 822-834

Federico Gizzi, Le chiese rinascimentali di Roma, Newton Compton, Roma 1997

Fortunato, Giuseppe (2010). “The role of architectural representation for the analysis of the built. The 3d survey of San Pietro in Montorio’s temple in Rome”. Acts of X Congreso Internacional expresión gráfica aplicada a la edificación, Alicante, Editorial Marfil”

Carl Liutpold Frommel, La città come opera d’arte: Bramante e Raffaello, in A. Bruschi (a cura di), Storia dell’architettura italiana, il primo Cinquecento, Electa, Milano 2002, pp 76-131, in partic. pp. 80-82



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

*Livia Fabbri*

Gustavo Giovannoni, Tra la cupola di Bramante e quella di Michelangelo, in «Saggi sulla architettura del Rinascimento», Milano 1931, pp. 145-174

José Sancho Roda, Proyecto de restauración del templete de Bramante, in «restauración & rahabilitación. Revista internacional del Patrimonio Histórico», 17, Madrid 1998, pp. 28-37.

Emilio Lavignino, San Pietro in Montorio, 1960 Roma

Paul Marie Letarouilly, Edifices de Rome moderne, ,Novara,1992 pp. 103-105, 323

Carlos Martiaris, Le variazioni dell’identità -il tipo in architettura,Torino,1990 pp. 54-59

Peter Murray, Storia universale dell’architettura: Rinascimento, Electa, Milano 1971

Andrea Palladio, I quattro libri dell’architettura, Venezia 1570

Sebastiano Serlio, Il terzo libro di Sebastiano Serlio bolognese nel qual si figurano e descriuono le antichità di Roma e le altre che sono in Italia, e fuori de Italia, Bologna 1554

Giuseppe Tibaudò, Precisazioni sul tempietto di S. Pietro in Montorio, in Studi bramanteschi, De Luca editore, Roma, 1974 pp.513-516

Claudio Tiberi, Misure e contemporaneità di disegno del chiostro di S.Maria della Pace e del Tempietto di S. Pietro in Montorio, in Studi Bramanteschi, Roma, 1974 pp. 437-482

Claudio Tiberi, Introduzione a Bramante, in Bramante tra Umanesimo e Manierismo,Roma 1970

Giorgio Vasari, Le vite de’ più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani, da Cimabue insino a’ tempi nostri, Firenze 1550,pag. 73

Vasio C. , Osservazioni sul tempietto di S. Pietro in Montorio, in “Roma”, 21, 1943 pp. 199-204

### ***Testi di riferimento sulle tematiche legate al rilievo***

AA.VV., Gli strumenti di conoscenza per il progetto di restauro,(Gangemi editore, Roma 1999)





“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

AA.VV, Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell’architettura e dell’ambiente, (Gangemi editore, Roma 2002)

AA.VV, Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell’architettura e della città, (Gangemi editore, Roma 2004)

Marcello Balzani, Marco Gaiani, Leonardo Seccia, Nicola Santopuoli, Morfologia e caratterizzazione colorimetrica e spettrale di elementi architettonici, in *Disegnare idee e immagini*, n° 18/19 Roma

Marcello Balzani, Marco Gaiani, Federico Uccelli, Leonardo Seccia, Nicola Santopuoli, Rilievi tridimensionali e indagini colorimetriche per il restauro e la conservazione: il cantiere del Colosseo, in “Colorimetria e Beni culturali”-Atti dei congressi di Firenze 1999 e Venezia 2000 a cura di C. Oleari, “Quaderni di ottica e fotonica” n. 6

Carlo Bianchini, “Modelli discreti e modelli continui nel rilievo e rappresentazione informatizzata dell’architettura”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 22, 2001, pp. 51-60.

Carlo Bianchini, “Nuove applicazioni fotogrammetriche al rilievo e rappresentazione delle superfici architettoniche”, in *Frontiere del Rilievo: dalla matita alle scansioni 3D - Strumenti del Dottorato di Ricerca n° 5 - Università “La Sapienza” di Roma*, Roma 2001

Carlo Bianchini, “Laser scanning X”, in Mario Docci ( a cura di), *Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell’architettura e della città*, Gangemi, Roma 2007, pp. 24-31.

Carlo Bianchini, “Dal reale al virtuale (e ritorno): il modello ligneo di Antonio da Sangallo il Giovane per il nuovo S. Pietro in Vaticano”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 34 del 2007, pp. 36-49.

Carlo Bianchini, “Rilievo e metodo scientifico”, in *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo*, Gangemi, Roma 2012, pp. 391-400.

Carlo Bianchini, Priscilla Paolini, “Rilievo per il restauro e la messa in sicurezza di Hagia Sophia a Istanbul: prime sperimentazioni”, in *Disegnare idee immagini*, n.26 del 2003

Carlo Bianchini, Carlo Inglese, “Il rilievo come sistema di conoscenza: prima sperimentazione a S. Maria della Rupe a Narni”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 41 del 2010, pp. 30-41.

Francesco Borgogni, *Rilievo per immagini: la fotomodellazione*, Tesi di Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo, XXIV Ciclo, Roma 2011.

Leandro Bornaz “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione.” In: *Laser scanning terrestre*” Curato da Prof. Fabio Crosilla, Università di Udine, Prof. Sergio Dequal, Politecnico di Torino /. CISM, Udine 2004.





“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Marco Carpiceci, *Fotografia digitale e architettura*, Aracne, Roma 2012.

Emanuela Chiavoni, “Il ruolo del rilevamento a vista nell’analisi dell’architettura”, in Mario Docci (a cura di), *Strumenti didattici per il rilievo*, Gangemi, Roma 2000, pp. 22-29.

Cesare Cundari, “Disegnare per conservare”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 0 del 1989, pp. 55-60.

Cesare Cundari (a cura di), *Il Palazzo Reale di Caserta*, Kappa, Roma 2005.

Cesare Cundari (a cura di), *Il Complesso monumentale del Verlasce in Venafro*, Kappa, Roma 2009.

Cesare Cundari (a cura di), *Il Complesso monumentale di San Vincenzo al Volturno*, Kappa, Roma 2009.

Cesare Cundari (a cura di), *Il complesso di Monteoliveto a Napoli: analisi, rilievi, documenti, informatizzazione degli archivi*, Gangemi, Roma 1999.

Cesare Cundari (a cura di), *Il Complesso Monastico di San Bernardino a L'Aquila: studi e rilievi per la valorizzazione*, Roma, Kappa, Roma 2010.

Marco Di Giovanni, “Guida al rilievo strumentale per la rappresentazione dell’architettura”, in Mario Docci (a cura di), *Strumenti didattici per il rilievo*, Gangemi, Roma 2000, pp. 64-74.

Mario Docci, Marco Gaiani, Riccardo Migliari, “Una nuova cultura per il rilevamento”, in *Disegnare idee e immagini* n° 23, del 2001

Mario Docci, Diego Maestri, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza 2009

Mario Docci (a cura di), *Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell’architettura e della città*, Gangemi, Roma 2007.

Mario Docci, Carlo Bianchini, “Contributi per una teoria del rilevamento architettonico”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 42 del 2011, pp. 34-41.

Mario Docci (a cura di), *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell’architettura e della città*, Gangemi, Roma 2011, pp. 58-70.

Alfonso Ippolito, “La modellazione delle superfici marmoree del Tempio del Divo Claudio a Roma”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 38 del 2009, pp. 76-85.

Alfonso Ippolito, Francesco Borgogni, A. Pizzo, “Digital mediation from discrete model to archaeological model: the Janus Arch”, in *Fusion of cultures, abstract of the XXXVIII annual conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archeology*, CAA 2010, Granada.







“Il Tempio di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

Livia Fabbri

Marco Gaiani, Federico Uccelli, Marcello Balzani, Reshaping the Coliseum in Rome: An integrated data capture and modeling method at heritage sites, in atti del convegno Eurographics 2000, Interlaken, 20 - 25 agosto 2000, Eurographics Association, Interlaken, 2000.

Marco Gaiani, “Per una revisione critica della teoria del rilievo dopo l’avvento dei mezzi digitali”, in *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo*, Gangemi, Roma 2012, pp. 375-382.

Marco Gaiani, Benedetto Benedetti, Fabrizio I. Apollonio, “Standard di acquisizione e strutturazione di modelli digitali per sistemi informativi di aree archeologiche: il caso di Pompei”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 39 del 2009, pp. 60-73.

Marco Gaiani, Guido Beltramini, Giacomo Fabbi, Fabrizio I. Apollonio, “Standard Villa Contarini a Piazzola sul Brenta: studi per un’ipotesi di attribuzione palladiana”, in *Disegnare Idee Immagini*, n. 42 del 2011, pp. 45-55.

Leonardo Paris, “Quantità e qualità nell’utilizzo dello scanner laser 3D per il rilievo dell’architettura”, in: *X Congreso International Expresión gráfica aplicada a la edificación. Alicante, 2, 3 e 4 dicembre 2010*, ALCOY: Editorial Marfil, 2010 vol. I, pp. 279-289.





## **RINGRAZIAMENTI**

A conclusione di questa ricerca, desidero ringraziare tutti coloro che con il loro aiuto hanno reso raggiungibile il presente studio, a cominciare dai miei tutor, i proff. Mario Docci e Carlo Bianchini che mi hanno guidato in questa esperienza di crescita professionale e formazione.

Intendo inoltre ringraziare Marco di Giovanni e Luca James Senatore per il supporto tecnico e per i consigli sull’impostazione durante la fase di ripresa sul campo.

Vorrei esprimere la mia più sincera gratitudine ai miei colleghi dottorandi ed in particolare a Gaia Lisa Tacchi e Francesca Porfiri, che mi hanno accompagnato durante questa esperienza.

Ringrazio inoltre la Real Academia di Spagna per la disponibilità e l’accoglienza offertami, nonché per la possibilità di effettuare il lavoro di ricerca presso la loro biblioteca.

Per il supporto tecnico della Leica Geosystem ringrazio Valentina Albano e Mario Rossi.

Ringrazio ulteriormente i proff. Flavia Cantatore e Carl Liutpold Frommel per il supporto storico e per aver messo a mia disposizione la loro conoscenza sul Tempietto.

Porgo i miei più sentiti ringraziamenti a Dott. Francesco Borgoni per la realizzazione dei modelli.

Un grazie affettuoso alla mia famiglia, che mi ha fatto supportato in questo studio ed in particolar modo mio figlio Alejandro, mia madre Simona, mio padre Antonio e mia sorella Daria.



“Il Tempietto di San Pietro in Montorio attraverso tecnologie di rilevamento avanzato per lo studio della forma, della materia e della struttura dell’architettura.”

---

*Livia Fabbri*